

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Modelování rozstříku reagentu a chemizmu technologie SNCR  
CFD Simulation of Droplet Injection and Chemical Reaction of SNCR  
Technology

Student:

Bc. Petr Vacula

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Blejchař, Ph.D.

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Vacula**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství  
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení  
Téma: **Modelování rozstřiku reagentu a chemizmu technologie SNCR**  
**CFD Simulation of Droplet Injection and Chemical Reaction of SNCR**  
**Technology**

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte CFD simulaci procesu SNCR ve spalovací komoře kotle, který spaluje hnědé uhlí. Geometrii vytvořte na základě výkresové dokumentace daného kotle. CFD model vytvořte v programu Ansys Fluent verze min 14.5. s využitím implementovaného modulu SNCR anebo s využitím kinetických parametrů navrhnete vlastní reakční schéma.
2. Simulaci proveďte pro tři výkonové úrovně kotle 60, 80, 100%.
3. Výsledky simulací porovnejte s výsledky fyzikálního měření, které bylo realizováno během provozních zkoušek technologie při výše specifikovaných výkonech.
4. Zobrazte oblast, ve které dochází k redukci NO<sub>x</sub> pomocí iso-ploch a stanovte v jakých teplotách dochází k rozstřiku reagentu. Dále odhadněte délku setrvání kapičky ve spalovací komoře do úplného vypaření ( $d < 1$  mikrometr).

Rozsah práce: min. 40 stran textu mimo přílohy.  
cca 20 stran grafických příloh.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Kohl, A., Nielsen, R.: *Gas Purification, Fifth edition*, Gulf Publishing Company, Houston, Texas 1997, ISBN 0-88415-220-0
- 2) Peters, N.: *Turbulent Combustion*, Cambridge University Press, 2000, ISBN 0-521-66082-3
- 3) Modest, M., F.: *Radiative Heat Transfer*, Academic Press, 2003, ISBN 0-12-503163-7
- 4) Kozubková, M.: *Simulace a modelování hydraulických systémů*, VŠB-TU Ostrava, 2009. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.
- 5) Bojko, M.: *3D proudění - Ansys Fluent učební test*, VŠB-TU Ostrava, 2012. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.
- 6) Kozubková, M., Blejchař, T., Bojko, M.: *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*, VŠB-TU Ostrava, 2011. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Blejchař, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

---

doc. Dr. Ing. Lumír Hružík  
*vedoucí katedry*



---

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
*děkan fakulty*

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě ..... 19. 5. 2014

.....  
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 19.5.2014

  
.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Petr Vacula

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Díly 538, Milotice

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VACULA, P. *Modelování rozstříku reagentu a chemizmu technologie SNCR*: diplomové práce. Ostrava: VŠB-Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 60 s, Vedoucí práce: Blejchař, T.

Diplomová práce je zaměřena na simulaci procesu SNCR ve spalovací komoře granulačního kotle K4, který spaluje hnědé uhlí. Nejprve byla na základě výkresové dokumentace vytvořena geometrie horní části kotle, jenž je potřebná pro simulaci technologie SNCR. V programu Ansys Fluent 14.5 byl s využitím implementovaného modulu SNCR simulován vliv technologie SNCR na vznik znečišťujících látek. Simulace byla provedena pro tři výkonové úrovně kotle a to 60 %, 80 % a 100 % výkonu kotle. Výsledky simulací byly porovnány s výsledky fyzikálního měření, které bylo realizováno během provozních zkoušek technologie SNCR při výše specifikovaných výkonech. Graficky byly znázorněny výsledky provedených simulací.

## ANNOTATION OF THE THESIS

VACULA, P. *CFD Simulation of Droplet Injection and Chemical Reaction of SNCR Technology*: Thesis. Ostrava: VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2014, 60 p, Supervisor: Blejchař, T.

The thesis is focused on the simulation of the SNCR process in the combustion chamber granulation K4 boiler that burns coal. First was based on drawings created by the geometry of the upper part of the boiler, which is necessary for simulation technology SNCR. The program Ansys Fluent 14.5 was using the embedded module SNCR simulated the impact of technology on the formation of pollutants. The simulation was performed for three power levels and boilers to 60 %, 80 % and 100 % of the boiler. The simulation results were compared with the results of physical measurements that were carried out during the operational test SNCR technology for the above specified performance. The results of the simulations were graphically illustrated.

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Tomáši Blejchařovi, Ph.D. za ochotu při odborných konzultacích a cenné připomínky, rady a podněty při tvorbě této diplomové práce.

Seznam použitého značení .....	10
Úvod.....	12
1. Seznámení s $\text{NO}_x$ .....	13
1.1. Nutnost redukovat $\text{NO}_x$ .....	13
1.2. Rozdělení zdrojů znečišťování ovzduší .....	13
1.3. Zdroje $\text{NO}_x$ .....	15
1.4. Oxidy dusíku $\text{NO}_x$ .....	16
1.5. Vznik $\text{NO}_x$ .....	17
2. Primární opatření pro snižování $\text{NO}_x$ .....	18
3. Sekundární opatření pro snižování $\text{NO}_x$ .....	18
3.1. Selektivní katalytická redukce (SCR).....	19
3.2. Selektivní nekatalytická redukce (SNCR) .....	19
3.3. Vliv reagentu na produkci aminového radikálu.....	21
3.4. Systém vstřikování reagentu .....	22
4. Popis granulačního kotle K4 v Opatovicích.....	24
4.1. Základní vlastnosti kotle K4 .....	24
5. Popis mlýnského okruhu .....	25
5.1. Části mlýnského okruhu .....	25
6. Vícefázové modely.....	27
6.1. Euler – Lagrangeův přístup.....	27
6.2. Euler- Euler přístup.....	27
7. Vícefázové matematické modely .....	28
7.1. VOF model .....	28
7.2. Model směsi.....	28
7.3. Eulerův model.....	30
8. Základní rozstřikovací modely.....	32
8.1. Kapková metoda .....	32



8.2.	Rozšířená kapková metoda .....	32
8.3.	LISA model (lineární nestabilita rozprašovacího filmu) .....	33
9.	Okrajové podmínky .....	35
9.1.	Typy zdrojů částic .....	35
10.	Simulace SNCR v horní části kotle K4 .....	37
10.1.	Konstrukce geometrie horní části kotle K4 .....	37
10.2.	Konstrukce vstřikovacích trysek .....	38
10.3.	Simulace technologie SNCR pro 100 % výkonu .....	41
10.4.	Simulace technologie SNCR pro 80 % výkonu .....	47
10.5.	Simulace technologie SNCR pro 60 % výkonu .....	53
11.	Závěr .....	58
	Seznam použité literatury .....	60

## Seznam použitého značení

Značka	Název	Rozměr
$c_k$	měrná tepelná kapacita	[J/kgK]
$d_d$	průměr dispergované částice	[m]
$D_{eff}$	průměr vstřikování	[m]
$D_{nozzle}$	průměr trysky	[m]
$D_p$	průměr kapiček	[m]
$f_i$	složky vnějších hmotnostních sil	[N]
$k_v$	výstupní koeficient	[1]
$L$	délkové měřítko turbulence	[m]
$L_s$	charakteristická délka	[m]
$n$	počet fází	[1]
$P_{vapor}$	tlak par	[Pa]
$P_{vena}$	statický tlak	[Pa]
$Q_m$	hmotnostní průtok	[kg/s]
$St$	Stokesovo číslo	[1]
$t$	čas	[s]
$t_s$	časová odezva systému	[s]
$u_{dr}$	složka unášivé rychlosti	[m/s]
$u_k$	složka rychlosti fáze $k$	[m/s]
$u_m$	zprůměrované složky rychlosti	[m/s]
$u_p$	rychlost fáze $p$	[m/s]
$u_{p,q}$	relativní rychlost	[m/s]
$u_q$	rychlost fáze $q$	[m/s]

Značka	Název	Rozměr
$U_{\text{eff}}$	rychlost vstřikování	[m/s]
$V_s$	charakteristická rychlost	[m/s]
$x_j$	souřadnice v kartézském systému (x, y, z)	[m]
$\alpha_k$	objemový zlomek fáze k	[1]
$\beta$	hmotnostní konzistence	[1]
$\gamma$	podíl hustot	[1]
$\Delta p$	tlakový rozdíl na trysce	[Pa]
$\delta_{ij}$	Kroneckerova delta	[1]
$\Theta$	úhel rozstříku	[°]
$\mu_c$	dynamická viskozita nosné fáze	[kg/ms]
$\mu_d$	dynamická viskozita dispergované fáze	[kg/ms]
$\mu_m$	dynamická viskozita směsi	[kg/ms]
$\rho_c$	hustota nosné fáze	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_k$	hustota dispergované fáze	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	hustota směsi	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\tau_d$	časová odezva částic	[s]

# Úvod

Cílem této diplomové práce je provést simulaci procesu SNCR ve spalovací komoře granulačního kotle K4, jenž spaluje hnědé uhlí. Při spalování hnědého uhlí vznikají znečišťující látky, mezi které patří také oxidy dusíku  $\text{NO}_x$ , na jejichž redukci se zaměřím. Díky Integrovanému národnímu programu snižování emisí v České republice musí dle zákona do roku 2016 všechny spalovací zařízení dosáhnout emisního stropu  $200 \text{ mg/m}_N^3$ . Jednou z možností, jenž napomáhá dosáhnout emisního stropu je technologie SNCR, která spočívá v redukci už vzniklých  $\text{NO}_x$  ze spalin, pomocí vstřikování reagentu do spalovací komory.

Porovnáním simulace implementovaného modulu SNCR v programu Ansys Fluent 14.5 a fyzikálního měření, které bylo realizováno během provozních zkoušek technologie SNCR, se zjistí, jak provedená simulace selektivní nekatalytické reakce koresponduje s reálným průběhem. Simulace bude provedena pro tři výkonové úrovně kotle 60 %, 80 % a 100 %.

V programu Ansys 14.5 byla na základě výkresové dokumentace vytvořena geometrie horní části granulačního kotle K4. Pro simulaci technologie SNCR v mé diplomové práci nebylo nutné vytvářet geometrii celého kotle, protože simulované chemické reakce probíhají v horní části kotle při teplotách od  $850^\circ\text{C}$  do  $1050^\circ\text{C}$ . Dále byla geometrie dostatečně vysítována. Dle konstrukčních možností kotle bylo navrženo umístění vstřikovacích trysek. V programu Ansys Fluent 14.5 bylo vytvořeno 8 trysek, které vstřikují reagent do spalovací komory vodorovně v totožném množství. Jako reagent byl v simulaci použit čpavek.

Z předchozích simulací hoření hnědého uhlí v granulačním kotli K4, které byly dodány vedoucím diplomové práce, byly zjištěny všechny potřebné okrajové podmínky nutné k realizaci simulace technologie SNCR. Po nastavení všech okrajových podmínek nutných k využití implementovaného modulu SNCR byla spuštěna simulace, jejíž výsledky redukce  $\text{NO}_x$  byly graficky zobrazeny.

# 1. Seznámení s NO<sub>x</sub>

## 1.1. Nutnost redukovat NO<sub>x</sub>

Česká republika přijala opatření, kde je stanoveno v § 6 zákona č. 86/2002 Sb., o ochraně ovzduší, který tímto transponuje směrnici Evropského parlamentu a Rady 2001/81/ES z 23. října 2001, o národních emisních stropech pro některé znečišťující látky. Mezi hlavní znečišťující látky patří také oxidy dusíku NO<sub>x</sub>. Proto se v mé práci zabývám redukcí NO<sub>x</sub> u spalovacího kotle K4 metodou SNCR. Integrovaný národní program snižování emisí v České republice byl schválen v roce 2004 a jeho aktualizace proběhla v roce 2006. Do roku 2016 se požaduje dosáhnout u všech spalovacích zařízení emisního stropu 200 mg/m<sub>N</sub><sup>3</sup>. [1]

## 1.2. Rozdělení zdrojů znečišťování ovzduší

**REZZO** - Registr emisí a zdrojů znečištění ovzduší - eviduje zdroje ovzduší znečišťujících látek. Zdroje jsou rozděleny na stacionární a mobilní, přičemž stacionární jsou děleny na kategorie podle velikosti a významu. Dílčí soubory REZZO 1-3 zahrnují stacionární zdroje, REZZO 4 mobilní. [2]

### • REZZO 1 - velké stacionární zdroje znečišťování

Jsou to stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu vyšším než 5 MW a zařízení zvláště závažných technologických procesů. Jedná se hlavně o velké elektrárny, spalovny a další bodové zdroje. Sledují se jednotlivě. Provozovatelé těchto zdrojů jsou povinni aktualizovat databázi každoročním odevzdáváním formulářů dle vyhlášky 356/2002 Sb. Česká inspekce životního prostředí provádí kontroly těchto údajů. [2]

### • REZZO 2 - střední stacionární zdroje znečišťování

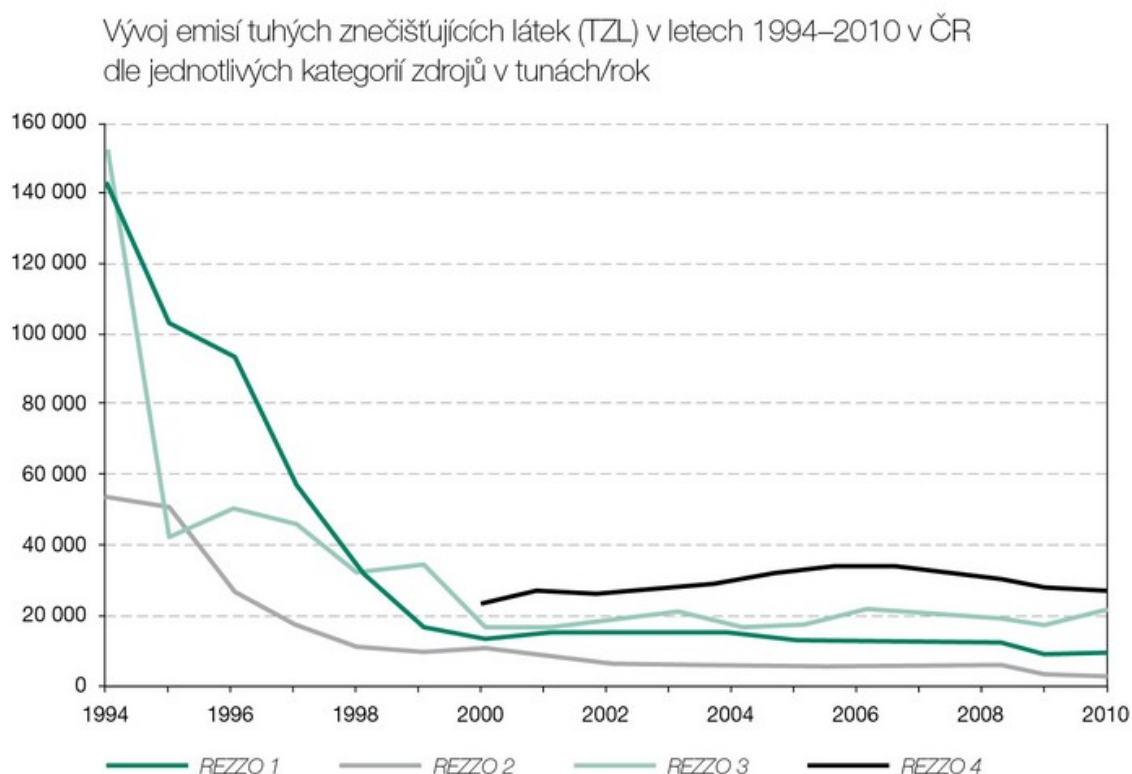
Jsou to stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu od 0,2 do 5 MW, zařízení závažných technologických procesů, uhelné lomy a plochy s možností hoření, zapaření nebo úletu znečišťujících látek. Sledují se jednotlivě. Podobně jako u REZZO 1 jsou data aktualizována pomocí formulářů. [2]

### • REZZO 3 - malé stacionární zdroje znečišťování

Jsou to stacionární zařízení ke spalování paliv o tepelném výkonu nižším než 0,2 MW, zařízení technologických procesů nespádajících do kategorie velkých a středních zdrojů, plochy, na kterých jsou prováděny práce, které mohou způsobovat znečišťování ovzduší, skládky paliv, surovin, produktů, odpadů, zachycených exhalátů a jiné stavby, zařízení a činnosti, výrazně znečišťující ovzduší. Jedná se hlavně o plošné zdroje, které se sledují hromadně. Emise z domácích topenišť jsou odhadovány díky informacím poskytnutým regionálními energetickými a teplotenskými závody. [2]

### • REZZO 4 - mobilní zdroje znečišťování

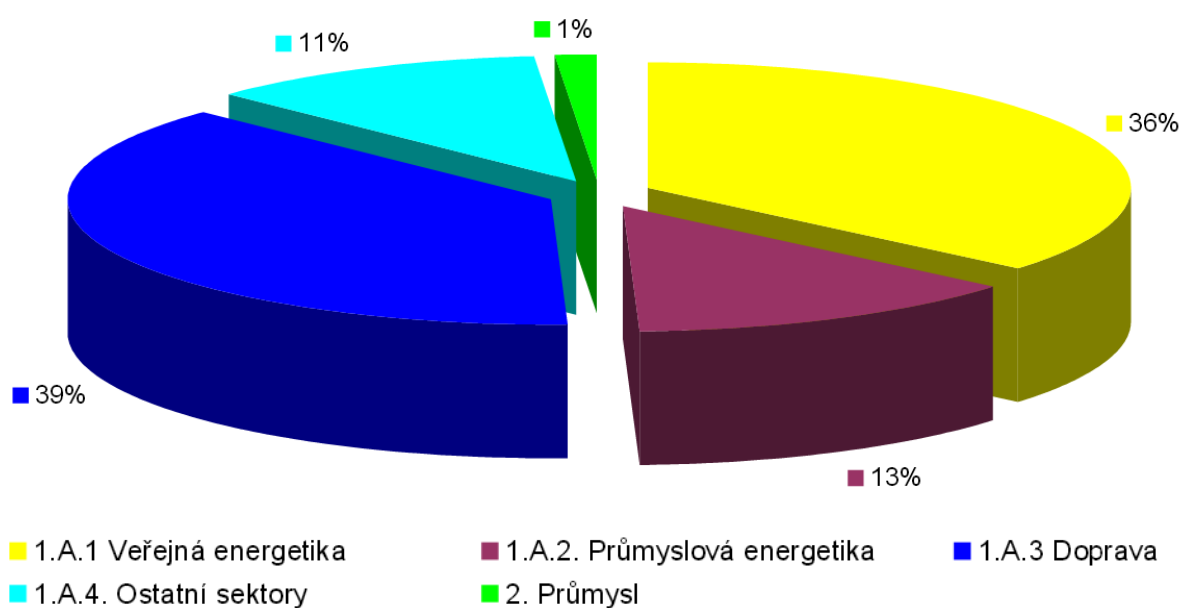
Jsou to pohyblivá zařízení se spalovacími nebo jinými motory, zejména silniční motorová vozidla, železniční kolejová vozidla, plavidla a letadla. Informace o emisích z mobilních zdrojů jsou získávány z Centra dopravního výzkumu. [2]



Obr.1.1 Graf tuhých znečišťujících látek v ČR 1994 až 2010 [3]

### 1.3.Zdroje NO<sub>x</sub>

Oxidy dusíku mohou vznikat z přirozených zdrojů nebo z antropogenních zdrojů. K přirozeným zdrojům řadíme sopečnou činnost, bakteriální a bouřkovou činnost. Do kategorie antropogenních zdrojů patří spalování fosilních paliv, jenž je využito v elektrárnách, teplárnách a automobilové dopravě. Procentuální podíl jednotlivých antropogenních zdrojů je zobrazen na Obr.1.2. [1]



Obr.1.2 Podíl různých zdrojů na emisích NO<sub>x</sub> [1]

## 1.4.Oxidy dusíku NO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub> vznikají při spalovacím procesu. Popis tohoto procesu je velmi složitý a je možné jej popsat řadou chemických dějů, které probíhají při vysokých teplotách mezi vzdušným dusíkem a kyslíkem. Oxidací dusíku, jenž je obsažen v palivu a kontaktem molekulárního dusíku s rozhraním plamene, kde za přítomnosti uhlovodíků dochází k radikálovým reakcím. Při ochlazování spalin se díky postupné oxidaci NO na NO<sub>2</sub> mění jejich poměr, proto se používá pojem NO<sub>x</sub>. Z celkového množství oxidů dusíku finální spaliny obsahují 95 % oxidu dusnatého NO, cca 5 % oxidu dusičitého NO<sub>2</sub> a nepatrné procento oxidu dusného N<sub>2</sub>O známého jako rajský plyn. [1]

### Oxid dusnatý NO

Oxid dusnatý je za normální teploty bezbarvý plyn, velmi jedovatý, který při kontaktu s kyslíkem reaguje na oxid dusičitý. Ve vodě je velmi málo rozpustný a řadí se mezi inertní oxidy. Je to důležitý meziprodukt při výrobě kyseliny dusičné. [4]

### Oxid dusičitý NO<sub>2</sub>

Oxid dusičitý NO<sub>2</sub> je hnědočervený, silně jedovatý plyn charakteristického zápachu. Za pokojové teploty dimeruje na N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, který je bezbarvý. Oxid dusičitý je posledním meziproduktem při výrobě kyseliny dusičné a snadno se rozpouští ve vodě za vzniku kyseliny dusité a kyseliny dusičné. Řadí se k plynům, které způsobují kyselé deště. [4]

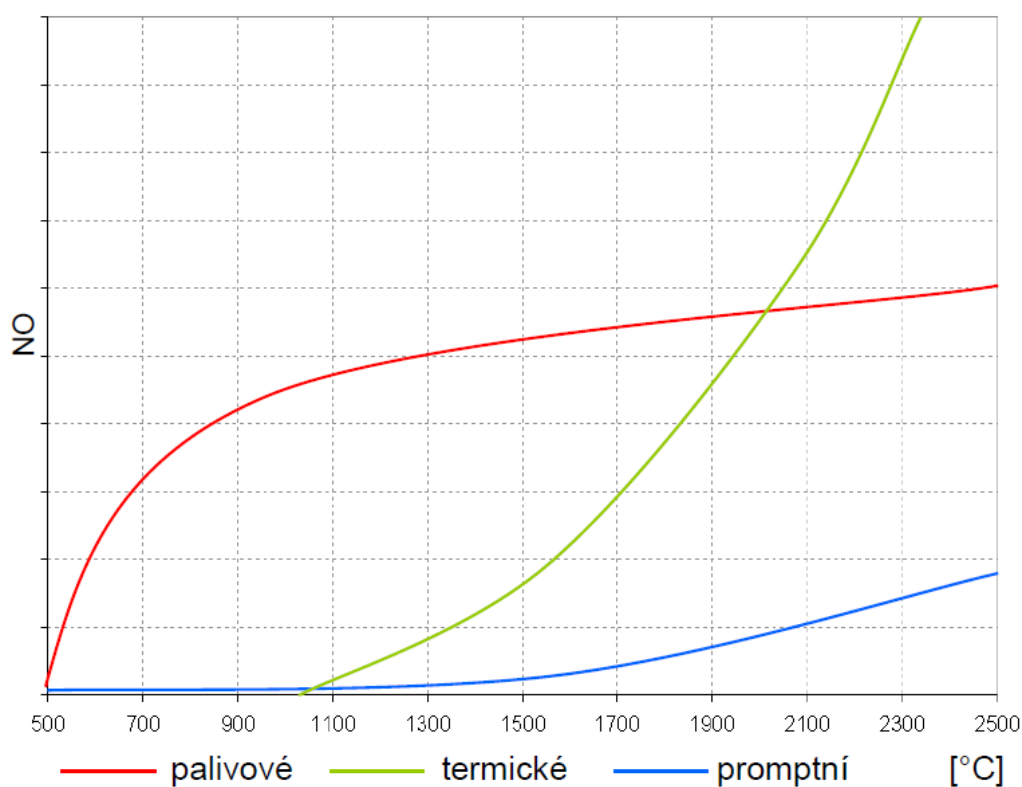
### Oxid dusný N<sub>2</sub>O

Oxid dusný N<sub>2</sub>O, nazývaný také rajský plyn, je bezbarvý plyn, slabého zápachu a nasládlé chuti, který byl v dřívějších dobách používán jako narkotikum při chirurgických operacích a dnes se používá jako hnací plyn ve sprejích. [4]



## 1.5. Vznik $\text{NO}_x$

Jsou tři základní typy vzniku oxidů dusíku a to palivové, termické a promptní. Emise  $\text{NO}_x$  produkují všechny uvedené typy, avšak poměr produkce  $\text{NO}_x$  je nesrovnatelný. Největším producentem jsou palivové  $\text{NO}_x$ , které mají největší nárůst při teplotách okolo 700 °C, po překonání teploty 900 °C závislost produkce  $\text{NO}_x$  na teplotě klesne a nárůst emisí  $\text{NO}_x$  je mírný. Proces produkce termických  $\text{NO}_x$  je závislý na vysokých teplotách a dostatečném setrvání v těchto oblastech s vysokými teplotami. Největší nárůst termických emisí  $\text{NO}_x$  je kolem teploty 1100 °C a závislost termických  $\text{NO}_x$  na teplotě je viditelná na Obr.1.3. Při zvyšující se teplotě rapidně narůstají emise  $\text{NO}_x$ . Promptní  $\text{NO}_x$  jsou poměrně zanedbatelné, se zvyšující teplotou je zaznamenán pouze velmi mírný nárůst  $\text{NO}_x$ . [5]



Obr.1.3 Závislost tvorby  $\text{NO}_x$  na teplotě. [5]

## 2. Primární opatření pro snižování NO<sub>x</sub>

Tyto opatření ovlivňují produkci NO<sub>x</sub> přímo v průběhu spalovacího procesu, většinou přímo ve spalovací komoře. Výhodou téměř všech primárních opatření jsou poměrně nízké provozní náklady, malé nároky na zastavěný prostor a po nainstalování snižují NO<sub>x</sub> trvale po celou dobu životnosti spalovacího zařízení. Nevýhody jsou vysoké pořizovací náklady a omezená účinnost, jenž se pohybují v rozmezí mezi 10 až 30 % dle velikosti spalovacího zařízení.

### Možnosti primárních opatření pro snižování NO<sub>x</sub>

- nízkoemisní hořáky
- optimalizace konstrukce a uspořádání hořáků
- jemnost mletí, výběr paliva (směsi paliva)
- úprava poměrů vzduch/palivo
- zrovnoměnění distribuce paliva do jednotlivých hořáků
- řízení poměrů vzduch/palivo - řízení distribuce paliva do jednotlivých hořáků
- snížení teploty spalovacího vzduchu
- recirkulace spalin

Vhodné primární opatření už jsou nainstalována téměř všude, kde při spalovacím procesu vznikalo velké množství NO<sub>x</sub> a byla zde zapotřebí jeho redukce. Jenže ani tyto opatření nemusí stačit k tomu, aby byly splněny zákonné limity, jenž vstoupí v platnost v roce 2016.[5]

## 3. Sekundární opatření pro snižování NO<sub>x</sub>

Spočívají v redukci už vzniklých NO<sub>x</sub> ze spalin pomocí chemických reakcí. U všech sekundárních metod využíváme reakci radikálů NH<sub>2</sub> s NO za vzniku molekulárního dusíku N<sub>2</sub> a vody H<sub>2</sub>O.

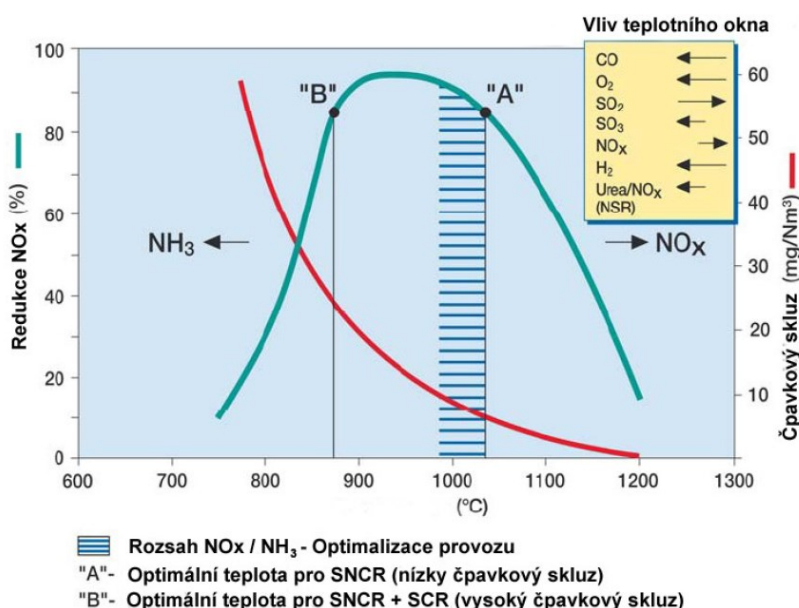
### 3.1. Selektivní katalytická redukce (SCR)

Selektivní katalytická redukce je založena na již uvedených chemických reakcích. Díky použití katalyzátoru probíhají reakce při teplotách 300 až 400 °C. Do spalin je vstřikován čpavek a tato směs spalin a čpavku je následně odvedena do katalyzátorového reaktoru, ve kterém se oxidy dusíku obsažené ve spalinách změní na dusík a vodní páru. Účinnost snížení emisí  $\text{NO}_x$  u metody SCR je 80 až 90 %. Katalyzátory jsou nejčastěji vyrobeny z oxidů vanadu, molybdenu, wolframu a jejich kombinací. Jejich cena je poměrně vysoká a životnost naopak poměrně nízká.

### 3.2. Selektivní nekatalytická redukce (SNCR)

Účinnost této metody je velmi závislá na teplotě. Pro správné fungování technologie SNCR musí být reagent vstřikován do teplotního okna 800 až 1050 °C. Proto je umístění vstřikovacích trysek ve spalovací komoře kotle velmi důležité. Účinnost snížení emisí  $\text{NO}_x$  u metody SNCR je 40 až 60 %. [6]

Pokud je reagent vstřikován do oblasti s nízkou teplotou, oxidy dusíku  $\text{NO}_x$  nereagují s radikálem  $\text{NH}_2$ , protože reakční rychlost je nízká. To má za následek zvýšení koncentrace čpavku  $\text{NH}_3$  ve spalinách (čpavkový skluz). Pokud je naopak reagent vstřikován do oblasti s vysokou teplotou,  $\text{NH}_2$  radikál začne přednostně reagovat s kyslíkem  $\text{O}_2$ , což má za následek naopak zvýšení koncentrace  $\text{NO}_x$  ve spalinách. [5]



Obr.3.1 Teplotní okno vhodné pro technologii SNCR [5]

Na Obr.3.1 je mezi body B a A znázorněno optimální teplotní okno pro technologii SNCR. V rozmezí těchto bodů není redukce  $\text{NO}_x$  nějak výrazně rozdílná, ovšem produkce  $\text{NH}_3$  se snižující se teplotou rapidně roste. Pro optimální fungování technologie SNCR se doporučuje vstříkovat reagent do modře vyšrafované oblasti nalevo od bodu A. I když není dosaženo maximální možné redukce  $\text{NO}_x$ , produkce  $\text{NH}_3$  může vést k tvorbě amonných solí, které mohou zapříčinit zanášení teplosměrných ploch ekonomizéru a ohříváku spalovacího vzduchu.

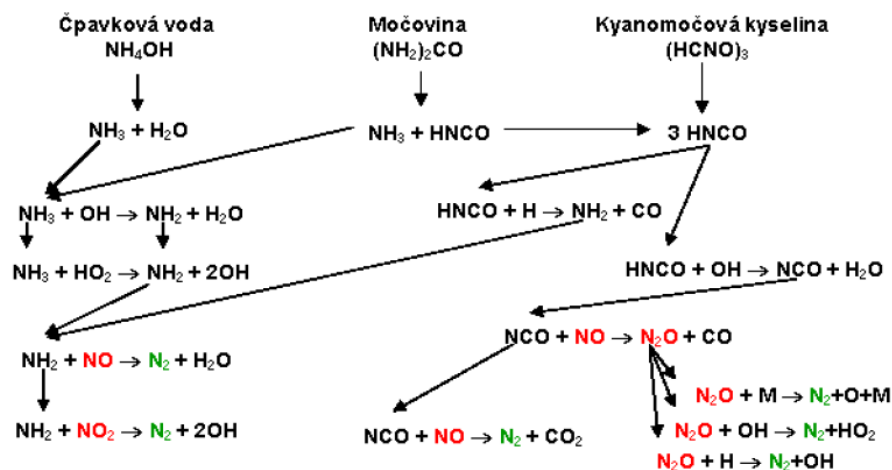
Jelikož může teplota ve spalovací komoře kolísat, vstřikovací trysky se umísťují do několika pater, aby bylo možné, pomocí měření teploty, regulovat množství a vstřík reagentu do správného teplotního okna. Vliv teploty je tak velký, že je vyžadována maximální přesnost vstříku reagentu do požadovaného teplotního okna 800 až 1050 °C.

### **Používané reagenty**

- Močovina  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$
- Kyanomočová kyselina  $(\text{HNCO})_3$
- Čpavek  $(\text{NH}_3)$
- Čpavková voda  $\text{NH}_4\text{OH}$

V elektrárnách, teplárnách a dalších energetických provozech, které se nachází v blízkosti obydlí, se používá z bezpečnostních důvodů obvykle močovina. Když jsou vstřikovací trysky umístěny v blízkosti teplosměrných ploch, je výhodnější použít čpavkovou vodu, která na rozdíl od močoviny nepoškodí díky svým vlastnostem teplosměrné plochy. Naopak, v chemických provozech se využívá čpavku nebo čpavkové vody. Obě látky jsou produkovány jako odpad, takže je jejich používání výhodné. Kyanomočová kyselina se používá velmi zřídka. [5]

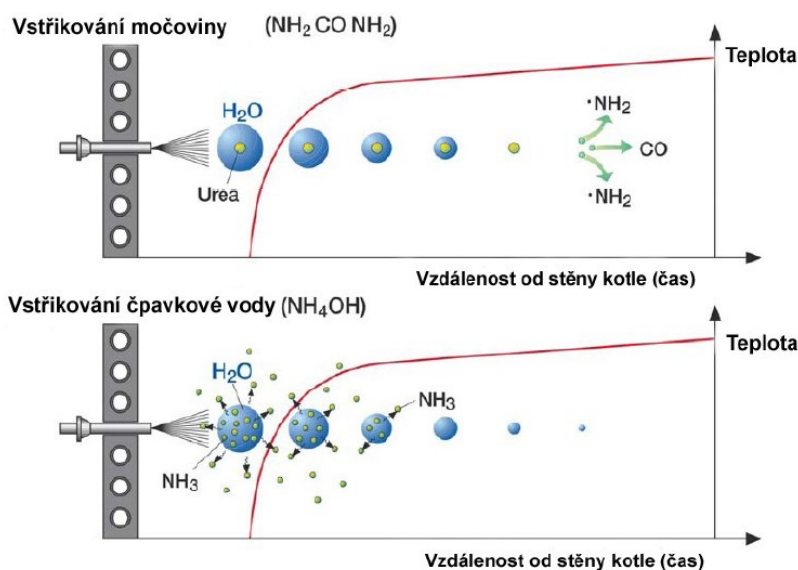
Chemické reakce, jenž probíhají po vstříku reagentu do spalin jsou velmi složité a proběhne jich velké množství. Základní chemické reakce jsou popsány na Obr.3.2.



Obr.3.2 Průběh chemických reakcí u technologie SNCR [7]

### 3.3. Vliv reagentu na produkci aminového radikálu

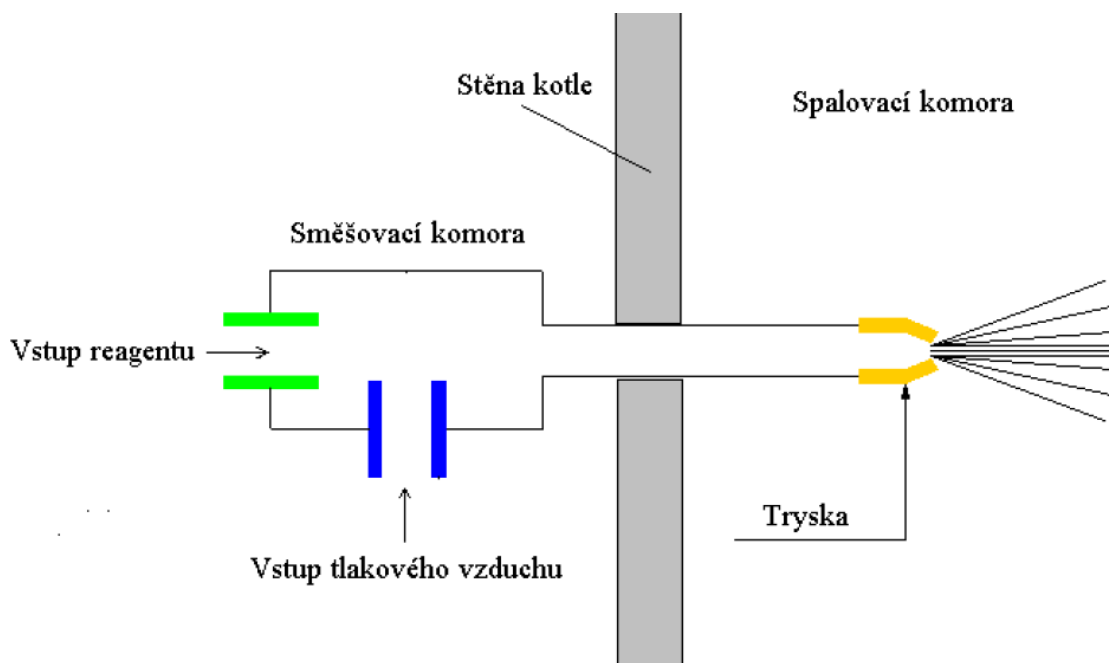
Při vstřiku močoviny se nejprve musí odpařit veškerá voda přítomná v močovině, až po té dojde k samotné reakci popsané na Obr.3.3. Tato vlastnost je velkou výhodou, protože nám umožňuje pomocí regulace velikosti rozstříkovaných kapiček ovlivňovat hloubku penetrace. Také můžeme ovlivnit to, aby reakce proběhla ve správném teplotním okně. Pokud je močovina vstřikována do spalín o příliš vysoké teplotě nad  $1100^\circ\text{C}$ , zvětšení kapiček močoviny nám zajistí, že samotná reakce  $\text{NH}_2$  a  $\text{NO}_x$  proběhne ve vyhovující teplotě. Naproti tomu chemická reakce čpavkové vody ve spalínách začíná probíhat hned po vstřiku čpavkové vody do spalín Obr.3.3.



Obr.3.3 Průběh reakce při vstřikování močoviny a čpavkové vody [5]

### 3.4. Systém vstřikování reagentu

Skládá se ze směšovací komory, do které je přiveden reagent a tlakový vzduch. A z nosné trubky, jež je ukončena tryskou, která je výstupem směšovací komory, jejíž pomocí je reagent vstřikován do spalovací komory. Po přívodu reagentu a tlakového vzduchu 0,55 MPa do směšovací komory se ve směšovací komoře vytvoří homogenní směs. Tato směs je pomocí trysky rozstřikována do proudu spalin, kde probíhá chemická reakce, jenž snižuje finální obsah  $\text{NO}_x$  ve spalinách Obr.3.4. [5]



Obr.3.4 Vstřikovací mechanismus [5]

Střední průměr kapičky je kolem 0,15 mm. Průměr kapiček je velmi důležitý faktor, protože ovlivňuje v jakém teplotním okně reakce proběhne. Pokud by byl průměr kapiček větší než je potřeba, odpařování reagentu by probíhalo příliš dlouho. Chemická reakce by proběhla v nižších teplotách, než je doporučeno u technologie SNCR, což by vedlo k snížení redukce  $\text{NO}_x$  a vyššímu čpavkovému skluzu Obr.3.1. Naopak při malém průměru kapiček by se reagent odpařoval příliš rychle a reakce by proběhla ve vyšších teplotách, než je doporučeno u technologie SNCR, což by mohlo zapříčinit ještě větší obsah  $\text{NO}_x$  ve spalinách.

### **Seznam komponentů potřebných pro fungování technologie SNCR**

- Míchací nádrž
- Zásobní nádrž pro redukční činidlo (čpavková voda nebo roztok močoviny)
- Ponorné cirkulační čerpadlo
- Cirkulační potrubí
- Míchací a měřicí modul
- Doprava reagentu k jednotlivým tryskám
- Vstřikovací kopí
- Přívod roztoku močoviny
- Přívod procesní vody
- Přívod tlakového vzduchu
- Směšovací prvek technologie SNCR
- Potrubní systém
- Řídící skříň technologie SNCR

## 4. Popis granulačního kotle K4 v Opatovicích

### 4.1. Základní vlastnosti kotle K4

V Elektrárně Opatovice je kotel K4 jedním z šesti provozovaných parních kotlů. Tyto parní kotle s přirozenou cirkulací a Kramerovým ohništěm byly původně určeny pro spalování méně kvalitního severočeského a sokolovského uhlí. Kotle byly navrženy a vyrobeny v VŽKG a uváděny do provozu mezi lety 1950 až 1970. Základní projektované parametry kotle K4 a dnešní parametry kotle K4 jsou rozdílné, protože došlo k řadě úprav. [8]

	Projektované parametry	Po úpravě	Jednotka
Jmenovitý výkon tepelný	163	178	MW <sub>t</sub>
Jmenovitý výkon parní	230	250	t/h
Jmenovitá teplota přehřáté páry	530	530	°C
Jmenovitý tlak	18872	18872	MPa
Teplota nap. vody	215	208	°C
Jmenovitá teplota spal. vzduchu	410	410	°C
Konstrukční přetlak	28430	28430	MPa
Zkušební přetlak	41713	41713	MPa

Tab.4.1 Základní parametry kotle K4 [8]

Popis	250 t/h	Jednotka
Množství spalin na výstupu z kotle	276 597	m <sup>3</sup> /h (STP), vlhký
Množství spalin na výstupu z kotle	248937	m <sup>3</sup> /h (STP), suchý
H <sub>2</sub> O	10	%
O <sub>2</sub>	6	%, suchý
NO <sub>x</sub>	320 – 400	mg/m <sup>3</sup> , suchý

Tab.4.2 Základní údaje spalin [8]



Základní vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Výhřevnost	13,79	MJ/kg
Popel v sušině	31,74	%
Voda v původním vzorku	26,63	%
Elementární analýza hořlaviny	Hodnota	Jednotka
Uhlík v hořlavině	72,43	%
Vodík v hořlavině	6,4	%
Dusík v hořlavině	1,26	%
Kyslík v hořlavině	17,56	%
Celková spalitelná S v hořlavině	2,35	%

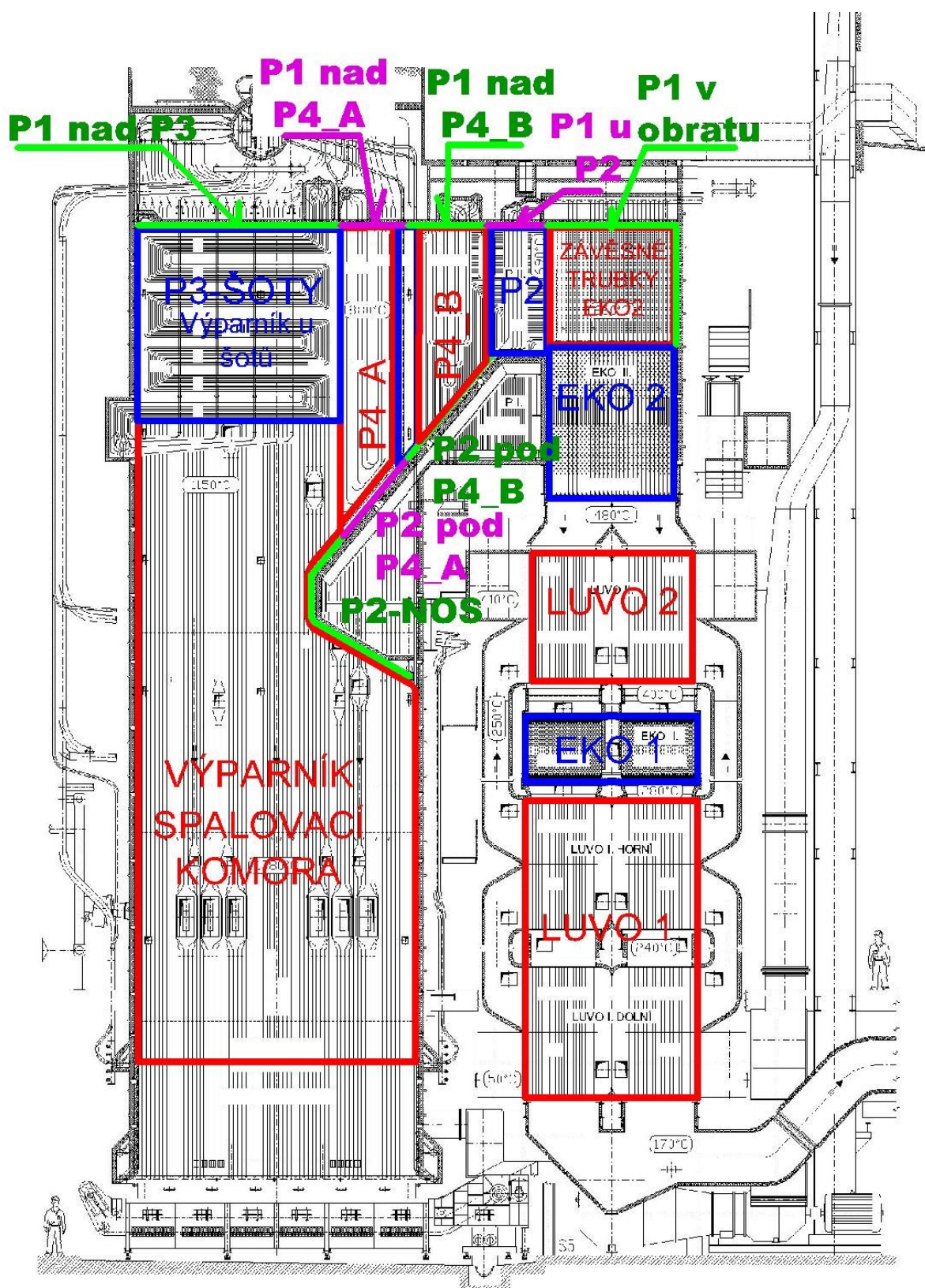
Tab.4.3 Palivo [8]

## 5. Popis mlýnského okruhu

Každý kotel obsahuje tlukadlové mlýny s přímým foukáním uhelného prášku do spalovací komory. U každého kotle jsou k dispozici 4 mlýnské okruhy. Provoz kotle při plném výkonu mohou zásobovat pouze 3 mlýny, ovšem pokud je spalováno odpovídající palivo 11 až 15 MJ/kg. Při spalování méně kvalitního paliva se uvedou do provozu všechny 4 mlýny. [8]

### 5.1. Části mlýnského okruhu

- Podavače s uhelnou svodkou a zásobníkem paliva
- Sušící šachta
- Vzduchovody
- Vlastní mlýny
- Třídící šachta s vestavbou
- Ambrazura



Obr.5.2 Granulační kotel K4 [8]

## 6. Vícefázové modely

Pro modelování rozstřiku reagentu u technologie SNCR použijeme vícefázové modely. Fázemi myslíme plyn, kapalinu, pevné látky. U problematiky modelování rozstřiku reagentu použijeme variantu vícefázových systémů plyn – kapalina.

V multifázovém proudění je fáze definována jako identifikovatelná třída materiálu, který má částečnou inertní odezvu na interakci s prouděním a potenciálem pole, ve kterém se vyskytuje. [10]

### Možnosti modelování vícefázových modelů

- Euler – Lagrangeův přístup
- Euler- Eulerův přístup

#### 6.1. Euler – Lagrangeův přístup

Tekutou fází uvažujeme jako kontinuum a řešíme Navier – Stokesovými rovnicemi. Naproti tomu dispergovanou fází řešíme stopováním velkého počtu bublin nebo kapek v proudovém poli. Dispergovaná fáze si může vyměňovat moment, hmotu a energii se spojitou fází.

Předpoklad pro tento model je, že dispergovaná fáze zaujímá malý objemový zlomek, i když pro hmotnost respektive pro hmotnostní průtok to nemusí platit ( $Q_{m,částic} \geq Q_{m,tekutiny}$ ). Trajektorie kapek jsou počítány jednotlivě v předdefinovaných intervalech během výpočtu spojitě fáze, takže můžeme tímto způsobem modelovat třeba proudění částic ve sprejích, sušičkách, spalování kapalných a uhelných paliv a částice ovlivněné prouděním.

Tento přístup není vhodný tam, kde objemový zlomek druhé fáze není zanedbatelný. Nevhodný pro modelování směsi kapalina – kapalina. [10]

#### 6.2. Euler- Euler přístup

Každou fází řešíme matematicky jako vzájemně se prostupující kontinua. Díky tomu, že objem jedné fáze není překryt objemem druhé fáze, je zaveden pojem objemového zlomku fáze. Objemové zlomky předpokládáme jako funkce spojitě v čase a prostoru, kde jejich součet je roven jedné. Rovnice definujeme pro každou fází. [10]

## 7. Vícefázové matematické modely

Můžeme modelovat více fází, které jsou odděleny, ale vzájemně se ovlivňují. Pro rozstřík reagentu u technologie SNCR nás zajímá kombinace plyn – kapalina. [9]

### Multifázové modely:

- VOF model
- Model směsi
- Eulerův model

### 7.1.VOF model

Jeho použití je vhodné u vrstveného proudění a proudění s volnou hladinou. Když řešíme proudění dvou či více nesmíselných kapalin je vhodné použít VOF model. Tento model pro nás není výhodný pro aplikaci rozstříku reagentu u technologie SNCR. [9]

### 7.2.Model směsi

Je zjednodušený vícefázový model, který můžeme použít k modelování vícefázového toku, v němž se jednotlivé fáze posouvají různou rychlostí. Předpokládá se ovšem lokální rovnováha na krátkém prostorovém délkovém měřítku. Vazba mezi fázemi musí být silná. Toho můžeme využít také k modelování homogenního vícefázového proudění s velmi silnou vazbou a fázemi pohybujícími se stejnou rychlostí. Modelem směsi můžeme modelovat mnoho fází řešením pohybové rovnice, rovnice kontinuity a rovnice energie pro směs, rovnice objemového zlomku pro druhou rozptýlenou fázi a algebraického výrazu pro relativní rychlosti. Tento model se nejvíce používá u aplikací sedimentace, částice s nízkým zatížením a bublinkovité proudění, kde objemový zlomek plynu je nízký.

Model směsi je vhodné použít, pokud se očekává velký výskyt rozptýlené fáze, jelikož má menší náročnost na výpočet. Můžeme použít pro aplikaci rozstříku reagentu u technologie SNCR.

Fáze se mohou pohybovat odlišnými rychlostmi, v tom případě se uplatňuje koncepce relativních (slip) rychlostí. [9]

Rovnice kontinuity pro směs je dána vztahem (7.1)

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_{m,j})}{\partial x_j} = 0 \quad (7.1)$$

Složky rychlosti  $u_{m,j}$  zprůměrované podle hmotnosti se vypočítají vzorcem (7.2)

$$u_{m,j} = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{k,j}}{\rho_m} \quad (7.2)$$

Hustota směsi  $\rho_m$  se vypočítá dle vztahu (7.3)  $\alpha_k$  je objemový zlomek fáze k.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (7.3)$$

Rovnice zachování hybnosti pro směs (7.4) je získána sečtením rovnic zachování hybnosti pro jednotlivé fáze.

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_m u_{m,j})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_m u_{m,i} u_{m,j}) = & - \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_m \left( \frac{\partial u_{m,i}}{\partial x_j} + \frac{\partial u_{m,j}}{\partial x_i} \right) - \mu \delta_{ij} \frac{2 \partial u_{m,l}}{3 \partial x_l} \right) + \\ & + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k u_{dr,km,i} u_{dr,k,j} \right) \end{aligned} \quad (7.4)$$

kde n je počet fází,  $f_i$  jsou složky vnějších hmotnostních sil  $\mu_m$  je dynamická viskozita směsi vypočtená dle vztahu (7.5)

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (7.5)$$

Složka unášivé rychlosti  $u_{dr,k,i}$  se vypočítá vzorcem (7.6)

$$u_{dr,k,i} = u_{k,i} - u_{m,i} \quad (7.6)$$

Relativní (slip) rychlost je definována jako rychlost sekundární fáze p k rychlosti sekundární fáze q dle vztahu (7.7)

$$u_{p,q,i} = u_{p,i} - u_{q,i} \quad (7.7)$$

Jestliže hmotnostní zlomek fáze k je dán vztahem (7.8)

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (7.8)$$

pak unášivá rychlost a relativní (slip) rychlost jsou ve vztahu (7.9)

$$u_{dr,p,i} = u_{p,q,i} - \sum_{k=1}^n c_k u_{k,q,i} \quad (7.9)$$

Upřesnění unášivé rychlosti je závislé na definování odporových sil částic

Rovnice objemového zlomku sekundární fáze je dána rovnicí (7.10)

$$\frac{\partial(\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_p \rho_p u_{m,j})}{\partial x_j} = - \frac{\partial(\alpha_p \rho_p u_{dr,p,j})}{\partial x_j} + \sum_{q=1}^n Q_{m,qp} - Q_{m,pq} \quad (7.10)$$

### 7.3. Eulerův model

Umožňuje nám modelování vícenásobných oddělených interaktivních fází. Počet fází u tohoto modelu nám litují pouze požadavky na paměť a konvergenci řešení. Takže můžeme modelovat libovolný počet dalších fází, pokud je k dispozici dostatečná paměť počítače.

Eulerův model používáme, pokud vyžadujeme přesnost výpočtu a nevadí nám výpočtová náročnost, když je rozptylovaná fáze koncentrována jen v určité oblasti. [9]

**Pro jednodušší určení vícefázového proudění zavádíme tyto pojmy:**

Hmotnostní konzistence  $\beta$  vypočtená dle vztahu (7.11)

$$\beta = \frac{\alpha_d \rho_d}{\alpha_c \rho_c} \quad (7.11)$$

$d$  je index dispergované fáze,  $c$  je index nosné fáze,  $\alpha$  je objemový zlomek,  $\rho$  je hustota

Podíl hustot  $\gamma$  vypočtený dle vztahu (7.12)

$$\gamma = \frac{\rho_d}{\rho_c} \quad (7.12)$$

Pokud je  $\gamma$  menší než 0,001 jde o fáze plyn – kapalina

Průměrná vzdálenost mezi částicemi je vyjádřena vztahem (7.13)

$$\frac{L}{d_d} = \left( \frac{\pi}{6} \cdot \frac{1+\kappa}{\kappa} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7.13)$$

$$\kappa = \frac{\beta}{\gamma} \quad (7.14)$$

Informace o těchto parametrech nám pomáhají zjistit, jaké bude chování dispergované (rozptylované) fáze.

### **Vzájemné působení mezi fázemi dělíme na tři skupiny**

Když jsou hodnoty  $\beta$  malé, tak ovlivňuje spojitá fáze částice přes odpor a turbulenci, ale částice neovlivňují spojitou fázi. Pro tyto případy můžeme použít Model směsi a Eulerův model, který je na tento typ díky své přesnosti výpočtu vhodný.

Když  $\beta$  dosahuje středních hodnot, tak je vztah mezi fázemi oboustranný a spojitá fáze ovlivňuje částice přes odpor, turbulenci a částice ovlivňují spojitou fázi prostřednictvím středního momentu a turbulence. Zde je možné použít Model směsi a Eulerův model, ale nutné brát v potaz další parametry, jako je Stokesovo číslo.

Když  $\beta$  dosahuje vyšších hodnot, tak se fáze ovlivňují navzájem a navíc se uvažuje tlak a viskózní napětí z důvodu existence částic. Zde je vhodné použít Eulerův model. [10]

Stokesovo číslo je vyjádřeno vztahem (7.15) mezi časovou odezvou částic a časovou odezvou systému.

$$St = \frac{\tau_d}{t_s} \quad (7.15)$$

Časová odezva částic  $\tau_d$  se vypočte vztahem (7.16)

$$\tau_d = \frac{\rho_d d_d^2}{18\mu_c} \quad (7.16)$$

Časová odezva systému  $t_s$  se vypočte vztahem (7.17)

$$t_s = \frac{L_s}{V_s} \quad (7.17)$$

$L_s$  charakteristická délka,  $V_s$  charakteristická rychlost

Pro Stokesovo číslo menší než 1 budou částice unášeny proudem a můžeme použít všechny tři modely.

Pro Stokesovo číslo větší než 1 se částice budou pohybovat nezávisle na proudu a můžeme použít Model směsi a Eulerův model.

Pro  $St \approx 1$  můžeme vybrat jakýkoliv ze tří modelů.

## 8. Základní rozstřikovací modely

- kapková metoda
- rozšířená kapková metoda
- LISA model

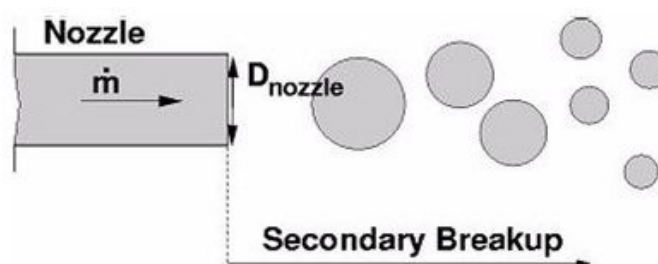
Primárním úkolem rozstřikovacích modelů je určit počáteční podmínky pro kapičky, které opouštějí vstřikovací trysky. Tyto podmínky jsou následující:

- počáteční poloměr částice
- počáteční složky rychlosti částice
- počáteční úhel vstřiku

Tyto parametry jsou ovlivněny interním proudem trysky (kavitace a turbulence vyvolané poruchami), stejně tak nestabilitou na rozhraní kapaliny a plynu. [11]

### 8.1. Kapková metoda

Je to jeden z nejjednodušších a nejoblíbenějších přístupů k definici podmínky vstřikování kapiček. V tomto přístupu se předpokládá, že není nutný podrobný popis vstřikovacích a rozprašovacích procesů v primární zóně rozstřiku. Kulové kapky mají jednotnou velikost, kdy se průměr kapek  $D_p$  rovná průměru trysky  $D_{nozzle}$ . Po té dochází k sekundárnímu rozpadu obr.8.1. Úhel rozstřiku je buď známý, nebo může být určen z empirické korelace. Tato metoda nevyžaduje žádné speciální nastavení. [11]



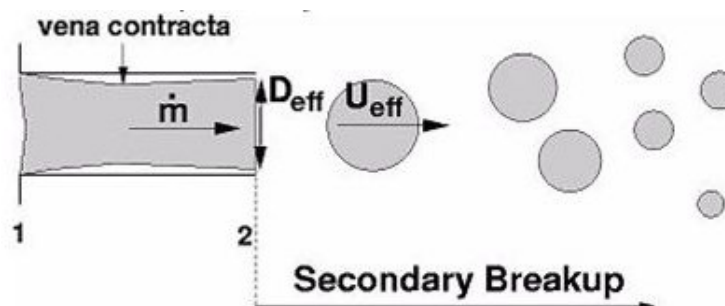
Obr.8.1 Kapková metoda

### 8.2. Rozšířená kapková metoda

Podobně jako u kapkové metody se předpokládá, že vstřikovací procesy nemusí být vyřešeny v detailu. Na rozdíl od kapkové metody umožňuje tato metoda vypočítat efektivní rychlosti vstřikování a účinný průměr injekce částic. V průběhu vstřikovacího procesu model



určuje průtok uvnitř trysky a kontroluje, zda nedochází ke kavitaci. Dynamicky mění průměr a rychlost vstřikovacích částic. Pokud je  $P_{\text{vena}}$  nižší než  $P_{\text{vapor}}$  předpokládá se, že uvnitř trysky dochází ke kavitaci a rychlost vstřikování  $U_{\text{eff}}$  a průměr vstřikování  $D_{\text{eff}}$  jsou vypočteny z bilance hybnosti. Počáteční průměr kapiček je roven průměru trysky  $D_{\text{nozzle}}$ . [11]



Obr.8.2 Rozšířená kapková metoda

Nezbytné informace potřebné pro rozšířenou kapkovou metodu:

- koeficient kontrakce
- celkový vstřikovací tlak kapaliny
- celková vstřikovací teplota
- tlak par
- vzdálenost tlakové sondy od vstřikovacího centra

### 8.3.LISA model (lineární nestabilita rozprašovacího filmu)

Model je schopen simulovat účinky primárního rozstříku v tlaku vířivých rozprašovačů. Pomocí tlaku je kapalina uvedena do rotačního pohybu ve vstřikovači a díky odstředivé síle se podél vstřikovací stěny vytvoří tenký film kapaliny, který obklopuje jádro vzduchu ve vstřikovači. Tento film je předmětem aerodynamických nestabilit, které způsobují rozstřík. V rámci modelu LISA je proces vstřikování rozdělen do dvou fází. [11]

#### Tvorba filmu

Vzhledem k odstředivému pohybu kapaliny uvnitř trysky se vytváří podél stěn film, jehož tloušťka  $h_0$  na výstupu z trysky lze vyjádřit vztahem (8.1) [11]

$$m = \pi \rho_p u h_0 (d_0 - h_0) \quad (8.1)$$

$m$  – hmotnostní průtok skrz trysku

$\rho$  – hustota kapaliny

$d$  – výstupní průměr trysky

$u$  – rychlost na výstupu z trysky

Předpokládá se, že celková rychlost  $U$  se vypočte vztahem (8.2)

$$U = k_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_p}} \quad (8.2)$$

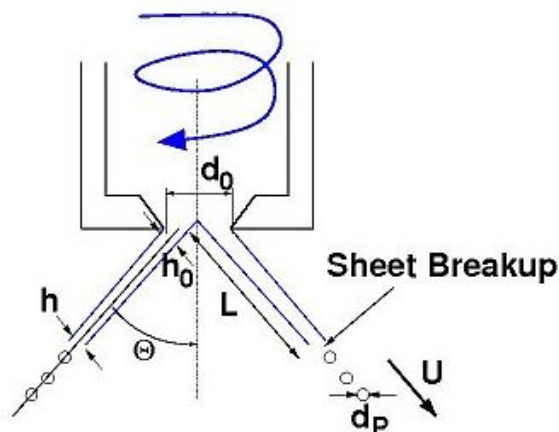
Výstupní koeficient  $k_v$  se vypočítá vztahem (8.3),  $\Delta p$  je tlakový rozdíl na trysce

$$k_v = \max \left( 0,7 \frac{4 m}{\pi d_0^2 \rho_p \cos \Theta} \sqrt{\frac{\rho_p}{2\Delta p}} \right) \quad (8.3)$$

$\Theta$  je úhel rozstříku, u kterého se předpokládá, že budeme znát jeho hodnotu.

### Rozbití filmu a jeho rozstřík

Když film kapaliny opustí vstřikovací trysku, je vystaven aerodynamické nestabilitě, která způsobuje rozstřík filmu. [11]



Obr.8.3 Vírový rozprašovač [11]

## 9. Okrajové podmínky

Primární okrajové podmínky, které je třeba poskytnout pro diskrétní výpočty v Ansys Fluent jsou okrajové podmínky, které definují výchozí pozice, rychlosti a další parametry pro každý proud částic a fyzikálních jevů, které působí na proudy částic.

Požadované hraniční podmínky jsou závislé na typu vstřikování. Okrajové podmínky poskytují počáteční hodnoty pro všechny závislé diskrétní fáze proměnných, které popisují za okamžitých podmínek jednotlivé částice a zahrnují následující: [11]

### Základní počáteční podmínky

- poloha ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ , souřadnice) částice
- rychlost ( $u$ ,  $v$ ,  $w$ ) částice
- průměr částice ( $d_p$ )
- teplota částice ( $T_p$ )
- hmotnostní průtok ( $m_p$ ) - požadováno pouze pro spojené výpočty
- další parametry - pokud je použit jeden z rozprašovacích modelů nebudou počáteční podmínky průměr, rychlost a poloha, ale pro složitost jsou zadávány globální parametry

Můžeme definovat libovolný počet různých sad výchozích podmínek pro diskrétní fáze částic za předpokladu, že má počítač dostatek paměti.

### 9.1. Typy zdrojů částic

Ansys Fluent nabízí několik druhů zdrojů částic

- jednoduchý
- skupina
- plný kužel
- povrch
- tlakový vír rozprašovač
- vzduchová oblast rozprašovač
- plochý vějíř rozprašovač
- prudký rozprašovač

Jednoduchý typ použijeme, když chceme definovat jednu hodnotu pro každou z počátečních podmínek.



Obr.9.1 Jednoduchý typ [11]

Typ skupina použijeme, chceme-li definovat rozsah pro jednu nebo více počátečních podmínek (např. rozsah průměrů).



Obr.9.2 Typ skupina [11]

Pokud použijeme jako zdroj částic typ povrch, proud částic bude propouštěn z každého aspektu námi definovaného povrchu.

Chceme-li definovat kuželový rozstřík ve 3D, tak použijete typ plný kužel.

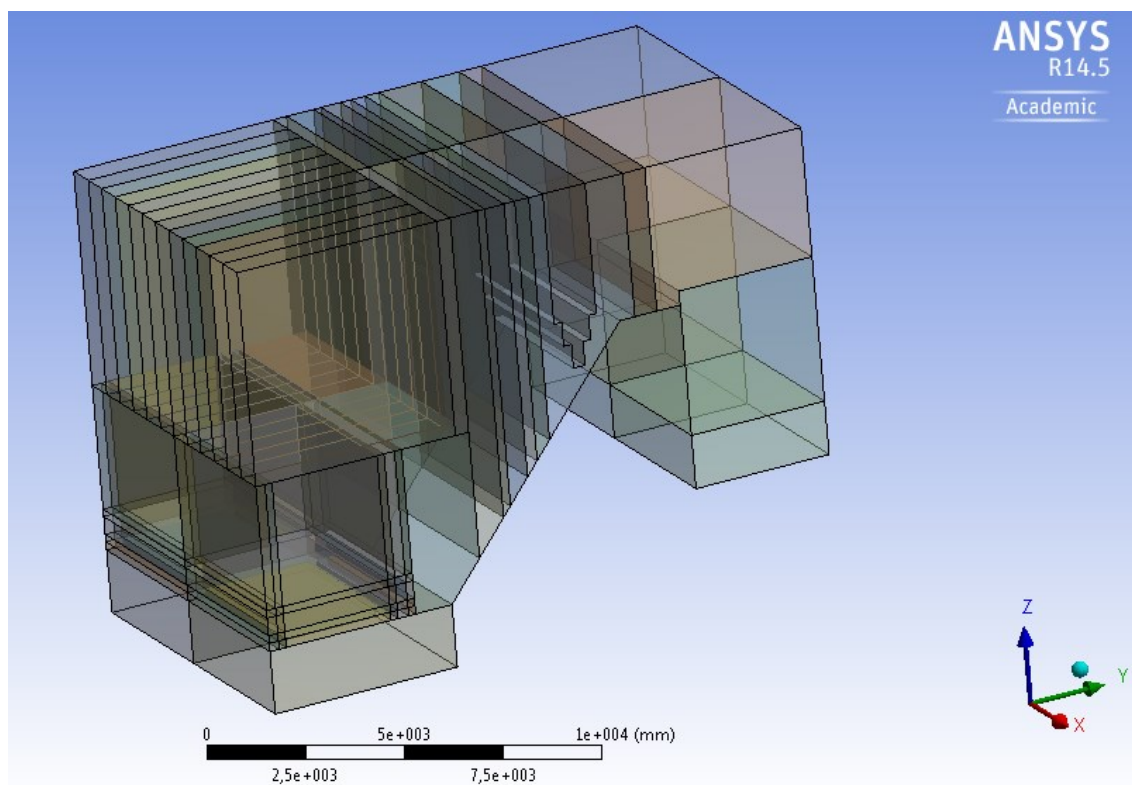


Obr.9.3 Plný kužel [11]

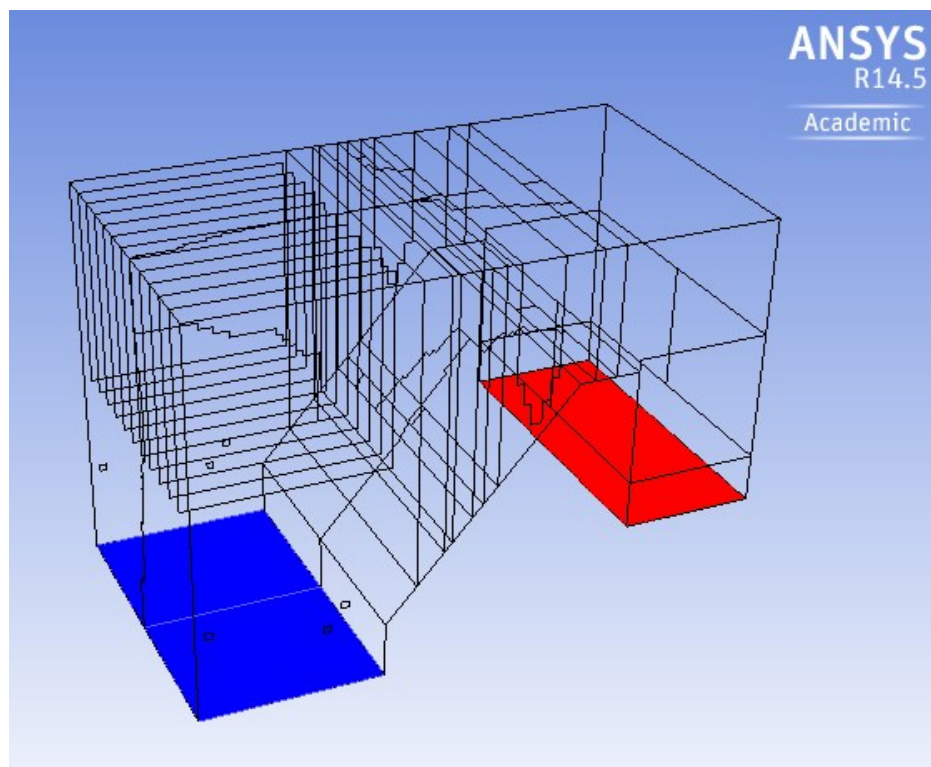
## 10. Simulace SNCR v horní části kotle K4

### 10.1. Konstrukce geometrie horní části kotle K4

V programu Ansys 14.5 jsem na základě zadané výkresové dokumentace vytvořil geometrii horní části granulačního kotle K4. Vstupní rovina je řez přední části kotle ve výšce 18,8 m a výstupní rovina je řez zadní části kotle za ve výšce 22 m. Kompletní geometrie horní části granulačního kotle K4 je zobrazena na Obr.10.1. Vstupní rovina je na Obr.10.2 označena modře a výstupní rovina je na Obr.10.2 označena červeně. Pro simulaci technologie SNCR v mé diplomové práci není nutné vytvářet geometrii celého kotle, protože potřebné chemické reakce probíhají v horní části kotle.



Obr.10.1 Geometrie horní části granulačního kotle K4



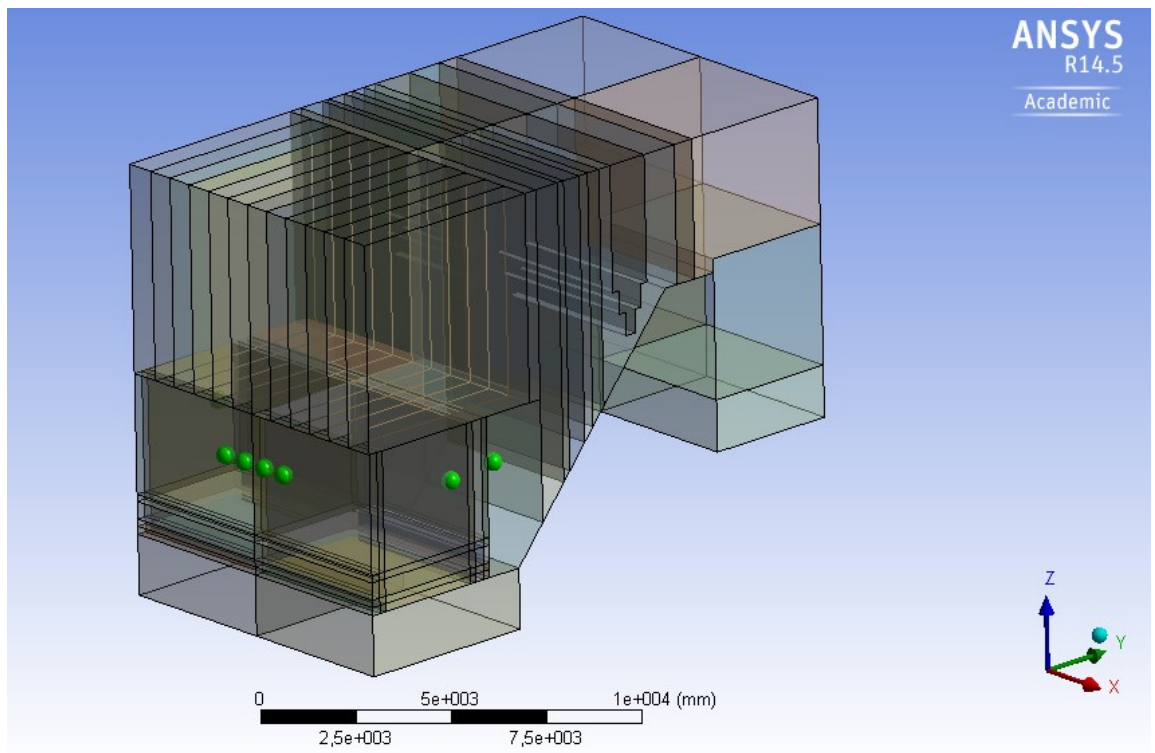
Obr.10.2 Vstupní a výstupní rovina horní části kotle K4

## 10.2. Konstrukce vstříkovacích trysek

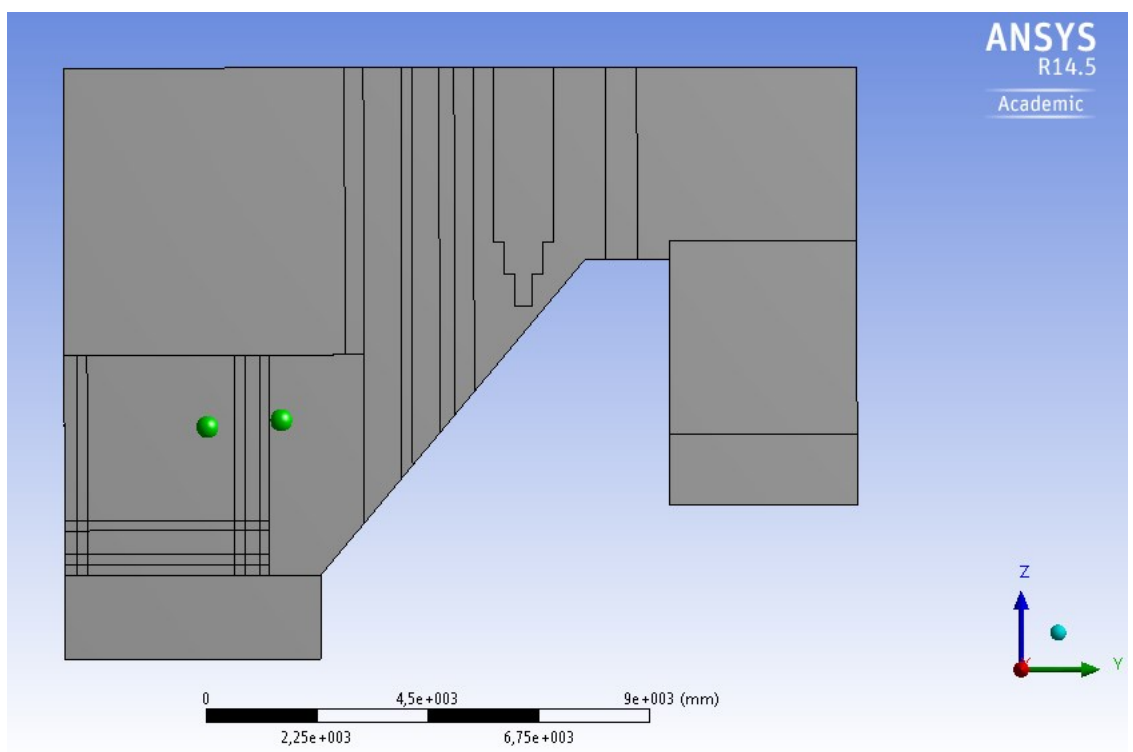
Dle konstrukčních možností kotle bylo navrženo umístění trysek. Podle souřadnic v Tab.10.2 jsem vytvořil 8 trysek, mezi které se rovnoměrně rozdělí zadaný hmotnostní průtok čpavku. Umístění trysek je názorně zobrazeno na Obr.10.3 pomocí zelených kulových ploch. Reagent je z trysek do kotle vstříkován vodorovně.

Popis	Číslo trysky	Souřadnice		
		x [m]	y [m]	z [m]
Čelo kotle	1	-1.125	-4.003	23.640
	2	-0.375	-4.003	23.640
	3	0.375	-4.003	23.640
	4	1.125	-4.003	23.640
Levá stěna kotle	5	-4.503	-1.157	23.605
	6	-4.503	0.343	23.740
Pravá stěna kotle	7	4.503	-1.157	23.605
	8	4.503	0.343	23.740

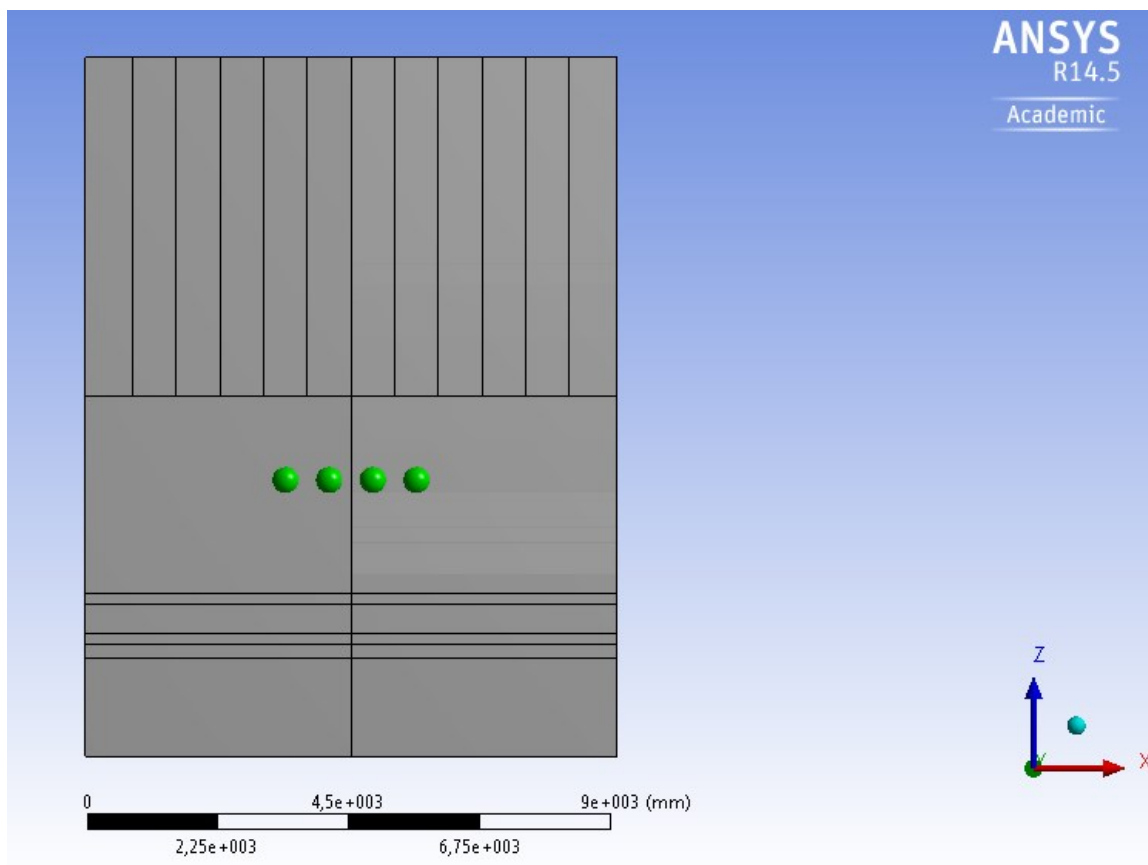
Tab.10.2 Souřadnice vstříkovacích trysek



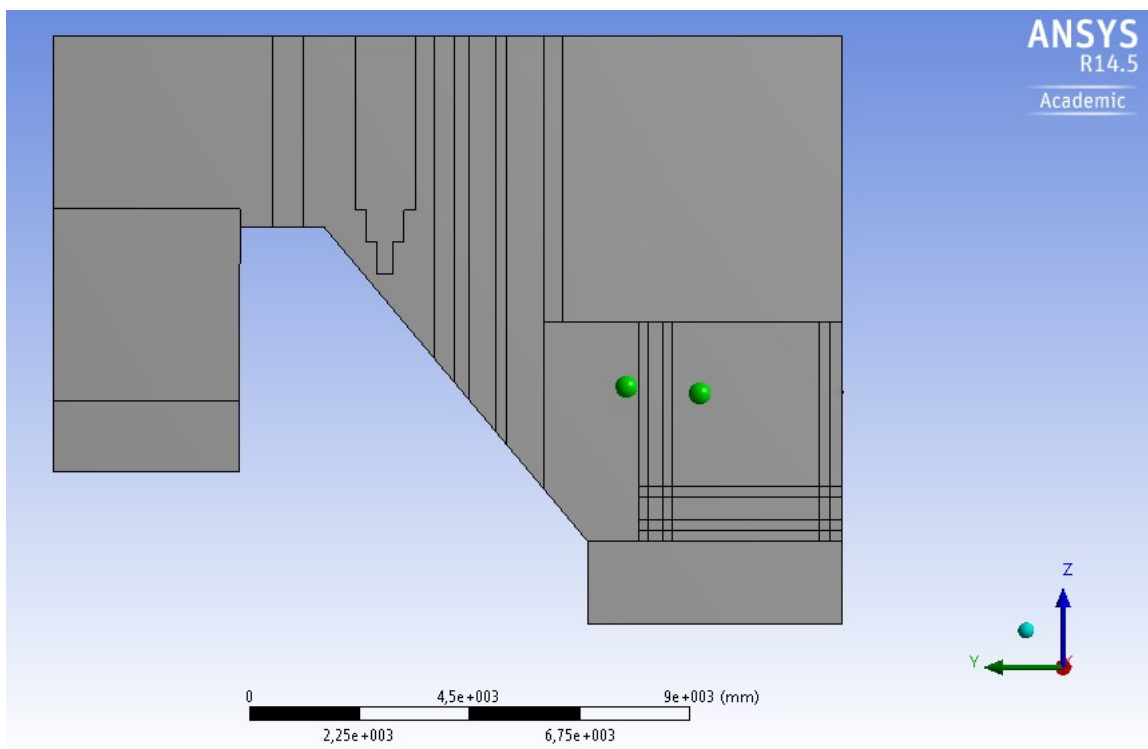
Obr.10.3 Umístění vstřikovacích trysek



Obr.10.4 Trysky na pravé stěně kotle



Obr.10.5 Trysky na čelní stěně kotle



Obr.10.6 Trysky na levé stěně kotle



### 10.3. Simulace technologie SNCR pro 100 % výkonu

Na vstupní rovinu jsem z Tab.10.3 nastavil počáteční okrajové podmínky pro 100 % výkonu kotle. Vstupní okrajové podmínky potřebné pro simulaci byly zjištěny z předchozích simulací hoření hnědého uhlí v granulačním kotli K4, které byly dodány vedoucím diplomové práce.

Hodnoty pro 100 % výkonu kotle		
Vstup	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní průtok	93,5949	kg/s
Teplota na vstupu	1402	K
Hmotnostní zlomek O <sub>2</sub>	0,02905	1
Hmotnostní zlomek CO <sub>2</sub>	0,19958	1
Hmotnostní zlomek CO	0,00009	1
Hmotnostní zlomek NO	0,00024	1
Hmotnostní zlomek NO <sub>2</sub>	0,00001	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub> O	0,00005	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub>	0,77099	1
Teplota výměníků	1015	K
Teplota stěn	829	K
Celkový hmotnostní průtok čpavku	0,048765	kg/s
Zredukovaný hmotnostní průtok čpavku jedna tryska	0,000610	kg/s

Tab.10.3 Vstupní hodnoty pro 100 % výkonu

Po simulaci technologie SNCR pro hodnoty v Tab.10.3 jsem zjistil, že celkový hmotnostní průtok čpavku 0,048765 kg/s je příliš veliký, protože na výstupní rovině byl v porovnání s měřením, zjištěn mnohonásobně větší čpavkový skluz a velká redukce NO<sub>x</sub>.

Díky testování různých hmotnostních průtoků čpavku jsem zjistil, že vhodný celkový hmotnostní průtok pro simulaci v programu Fluent 14.5 bude 10 % ze základní zadané hodnoty v Tab.10.3. Zadaný hmotnostní průtok čpavku v Tab.10.3 je tak vysoký, protože počítá s tím, že chemické reakce v reálném kotli neprobíhají ideálně a je nutné redukovat nejen NO<sub>x</sub> vzniklé při hoření, ale také redukovat NO<sub>x</sub> vzniklé při nesprávných chemických reakcích čpavku.

Zatím co Fluent 14.5 počítá s ideální reakcí čpavku a proto je hmotností průtok čpavku zredukován. Po rovnoměrném rozdělení zredukovaného hmotnostního průtoku mezi 8 trysek při 100 % výkonu granulačního kotle K4 vychází **hmotnostní průtok čpavku na jednu trysku 0,000610 kg/s**.

Hodnoty pro 100 % výkonu kotle		
Tepelný zdroj	Hodnota	Jednotka
EKO levé	-220895	W/m <sup>3</sup>
EKO pravé	-220895	W/m <sup>3</sup>
Výměník levý	-40497	W/m <sup>3</sup>
Výměník pravý	-40497	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 levý	-183706	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 pravý	-183936	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a levý	-308548	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a pravý	-308748	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b levý	-243590	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b pravý	-243821	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c levý	-185605	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c pravý	-185760	W/m <sup>3</sup>

Tab.10.4 Odvedené teplo z výměníků

Po nastavení všech potřebných okrajových podmínek pro simulaci technologie SNCR v granulačním kotli K4, při výkonu 100 % jsem spustil simulaci, jejíž výsledky jsou zaznamenány v Tab.10.5 a porovnány s měřením v Tab.10.6.

100 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky					
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	Jednotka
Vstup	240	-	80,5	14,7	70,3	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	132	4,4	77,5	14,2	67,6	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	108	-	3	0,5	2,7	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 45	-	- 3,7	- 3,4	- 3,8	[%]

Tab.10.5 Výsledky simulace SNCR pro 100 % výkonu

100 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky				
	Simulace		Měření		
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	NO	NH <sub>3</sub>	Jednotka
Vstup	240	-	240	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	132	4,4	137	7,3	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	108	-	103	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 45	-	- 43	-	[%]

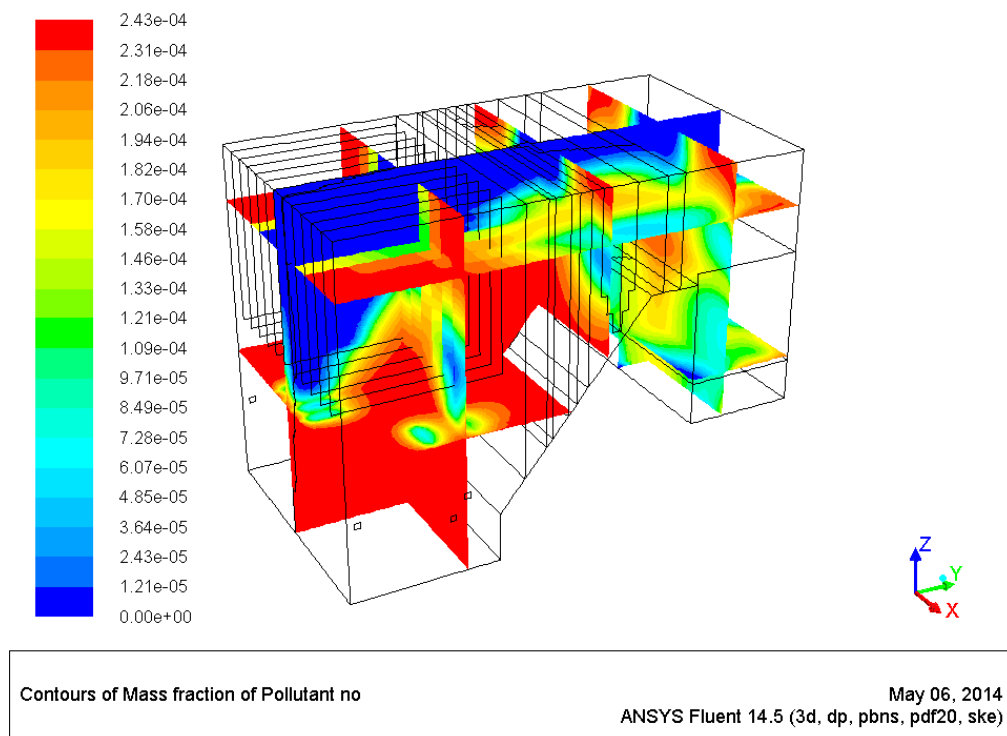
Tab.10.6 Porovnání simulace s měřením pro 100 % výkonu

100 % výkonu	Hodnota	Jednotka
Doba setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře	0,059	[s]

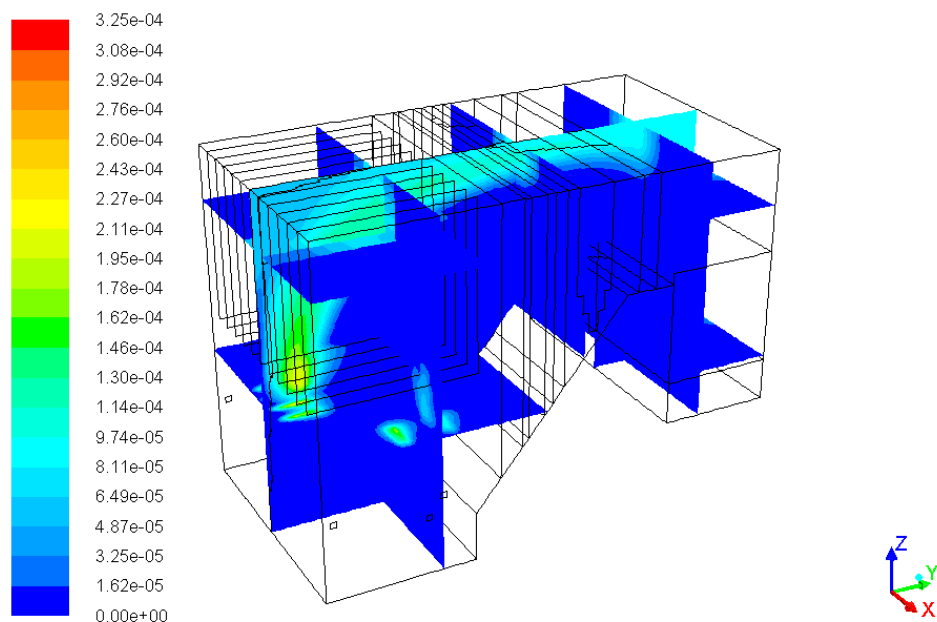
Tab.10.7 Doba setrvání kapiček v komoře při 100 % výkonu

### Vizualizace výsledků

Pro lepší orientaci v grafických výsledcích jsem zhotovil roviny, které vytváří řezy horní části granulačního kotle K4. V těchto řezech jsou patrné výsledky simulace.



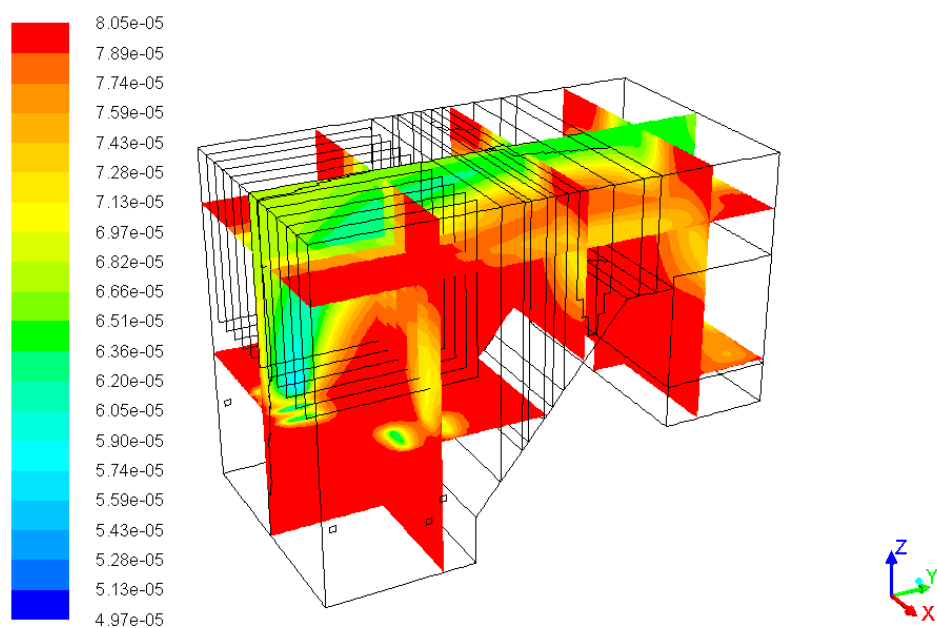
Obr.10.7 Koncentrace NO ve spalínách při 100 % výkonu



Contours of Mass fraction of Pollutant nh3

May 06, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

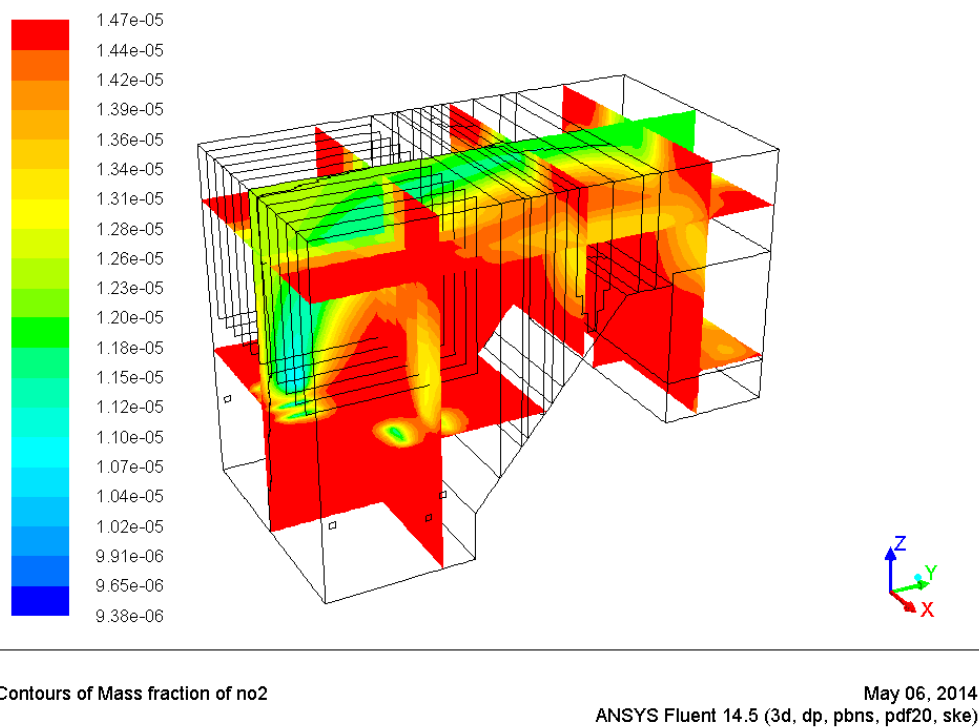
Obr.10.8 Koncentrace  $\text{NH}_3$  ve spalínách při 100 % výkonu



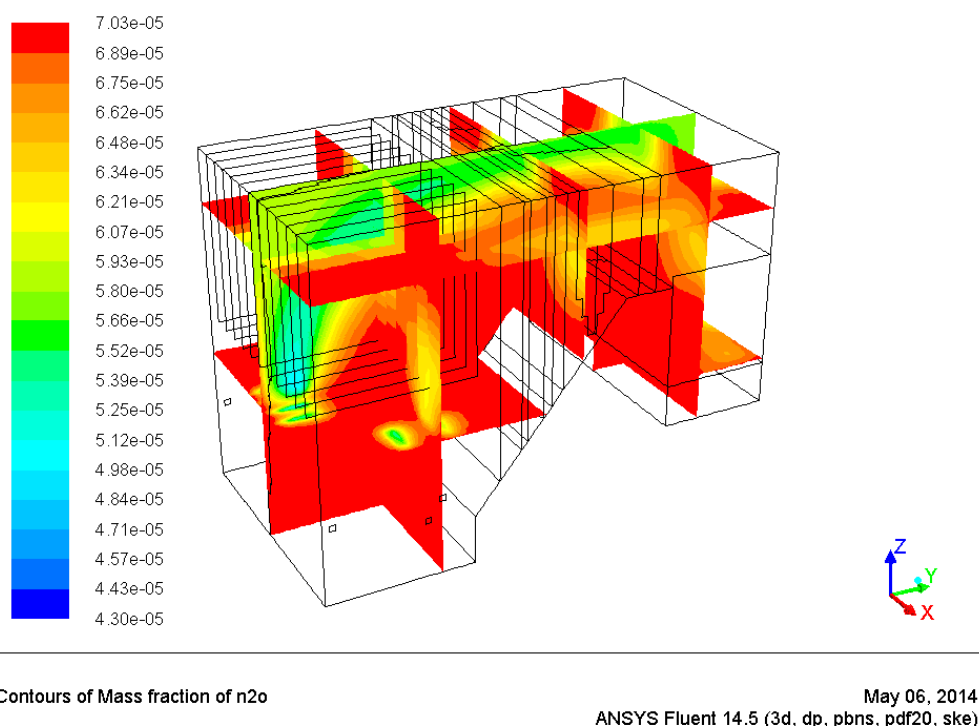
Contours of Mass fraction of co

May 06, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

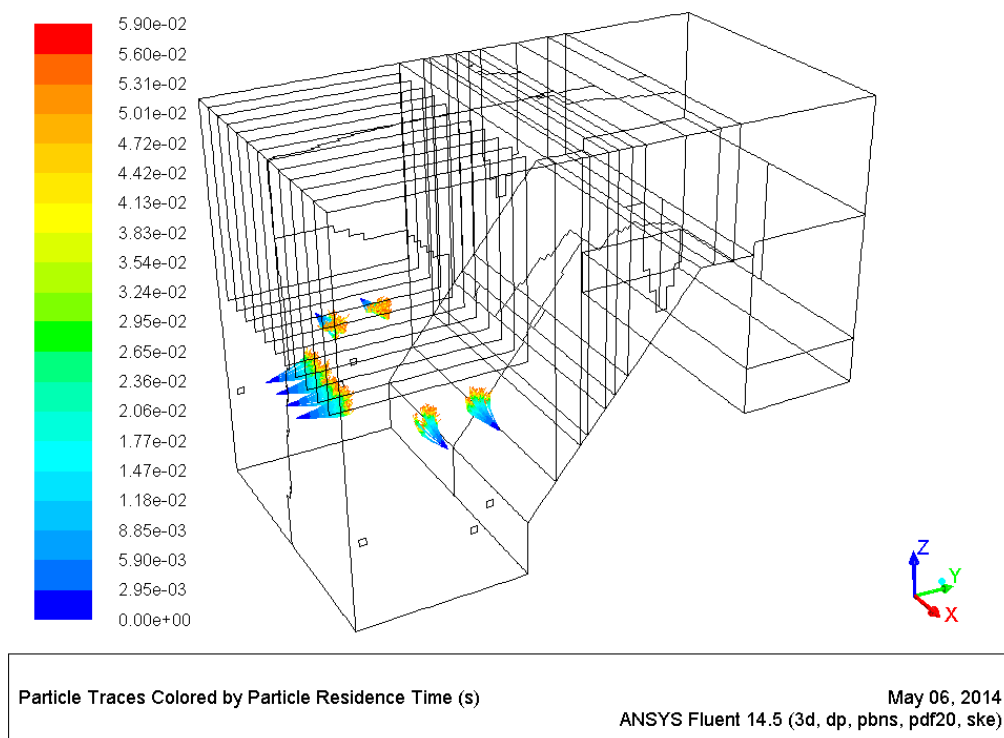
Obr.10.9 Koncentrace  $\text{CO}$  ve spalínách při 100 % výkonu



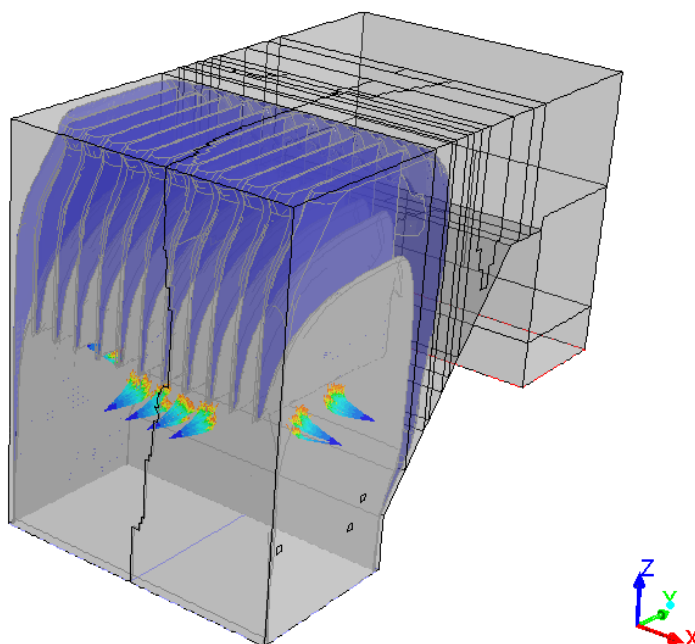
Obr.10.10 Koncentrace NO<sub>2</sub> ve spalínách při 100 % výkonu



Obr.10.11 Koncentrace N<sub>2</sub>O ve spalínách při 100 % výkonu



Obr.10.12 Setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře



Obr.10.13 Zobrazení teplotního okna pro 100 % výkonu

#### 10.4. Simulace technologie SNCR pro 80 % výkonu

Hodnoty pro 80 % výkonu kotle		
Vstup	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní průtok	81,7922	kg/s
Teplota na vstupu	1339	K
Hmotnostní zlomek O <sub>2</sub>	0,03733	1
Hmotnostní zlomek CO <sub>2</sub>	0,19095	1
Hmotnostní zlomek CO	0,00009	1
Hmotnostní zlomek NO	0,00033	1
Hmotnostní zlomek NO <sub>2</sub>	0,00002	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub> O	0,00007	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub>	0,77122	1
Teplota výměníků	960	K
Teplota stěn	803	K
Hmotnostní průtok čpavku	0,059673	kg/s
Zredukovaný hmotnostní průtok čpavku jedna tryska	0,000746	kg/s

Tab.10.8 Vstupní hodnoty pro 80 % výkonu

Hodnoty pro 80 % výkonu kotle		
Tepelný zdroj	Hodnota	Jednotka
EKO levé	-180483	W/m <sup>3</sup>
EKO pravé	-180483	W/m <sup>3</sup>
Výměník levý	-34502	W/m <sup>3</sup>
Výměník pravý	-34502	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 levý	-147312	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 pravý	-146446	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a levý	-274339	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a pravý	-271379	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b levý	-203809	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b pravý	-201897	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c levý	-147311	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c pravý	-146390	W/m <sup>3</sup>

Tab.10.9 Odvedené teplo z výměníků

Po nastavení všech potřebných okrajových podmínek pro simulaci technologie SNCR v granulačním kotli K4, při výkonu 80 % jsem spustil simulaci, jejíž výsledky jsou zaznamenány v Tab.10.10 a porovnány s měřením v Tab.10.11.

80 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky					
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	Jednotka
Vstup	330	-	80,8	29,5	98,7	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	172	5,2	79,2	28,9	96,8	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	158	-	1,6	0,6	1,9	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 48	-	- 2	- 2	- 1,9	[%]

Tab.10.10 Výsledky simulace SNCR pro 80 % výkonu

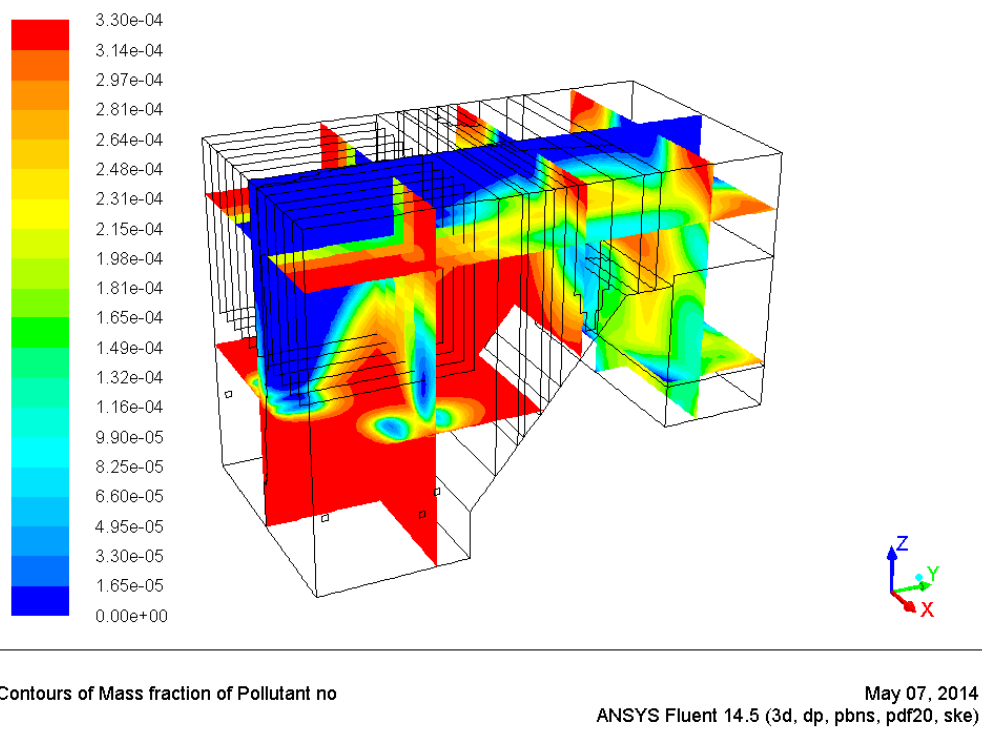
80 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky				
	Simulace		Měření		
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	NO	NH <sub>3</sub>	Jednotka
Vstup	330	-	330	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	172	5,2	177	5,3	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	158	-	153	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 48	-	- 46	-	[%]

Tab.10.11 Porovnání simulace s měřením pro 80 % výkonu

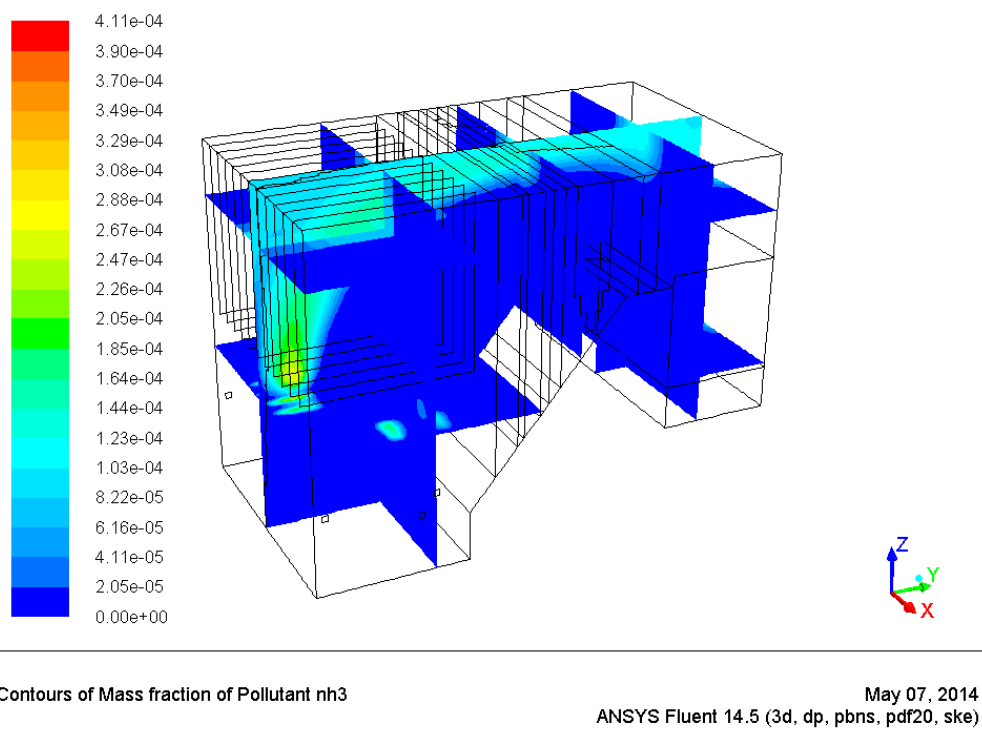
80 % výkonu	Hodnota	Jednotka
Doba setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře	0,062	[s]

Tab.10.12 Doba setrvání kapiček v komoře při 80 % výkonu

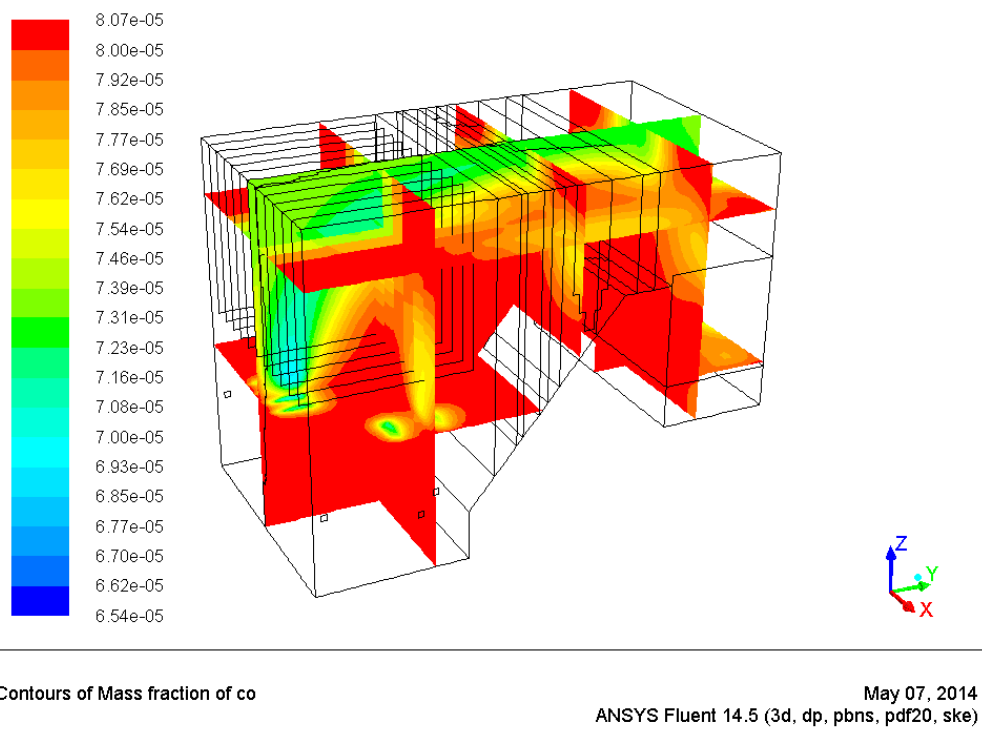




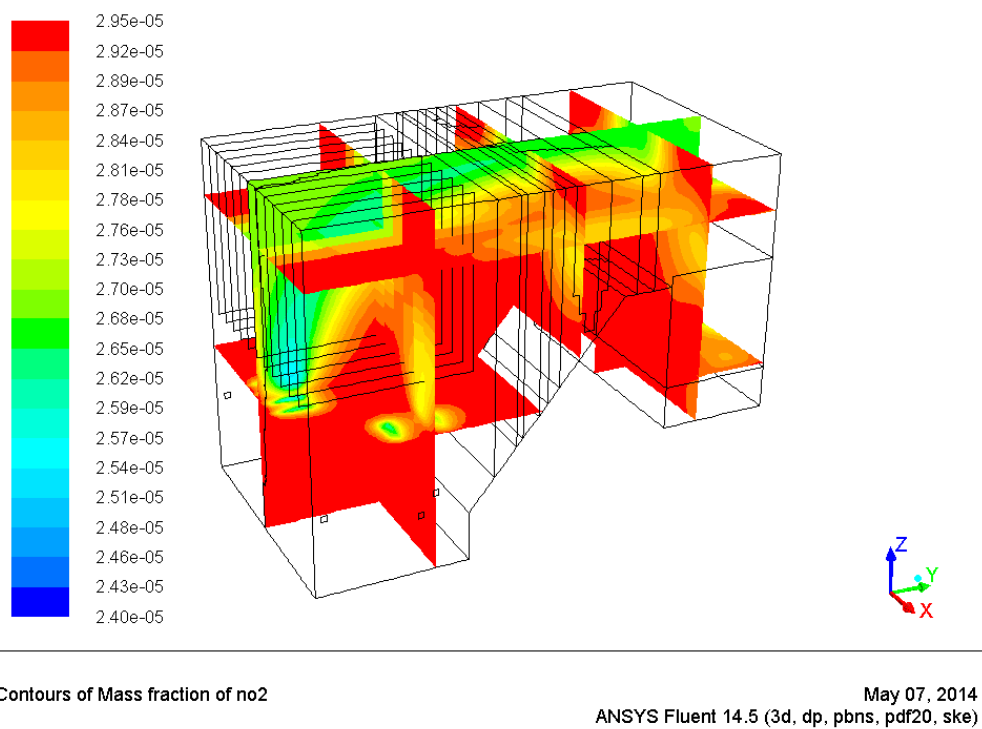
Obr.10.14 Koncentrace NO ve spalínách při 80 % výkonu



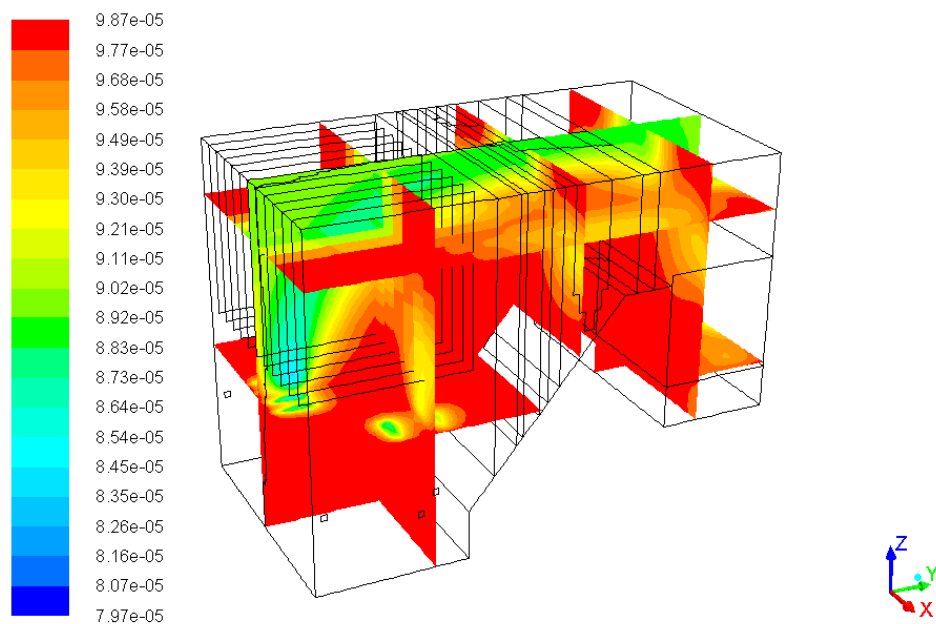
Obr.10.15 Koncentrace NH<sub>3</sub> ve spalínách při 80 % výkonu



Obr.10.16 Koncentrace CO ve spalínách při 80 % výkonu



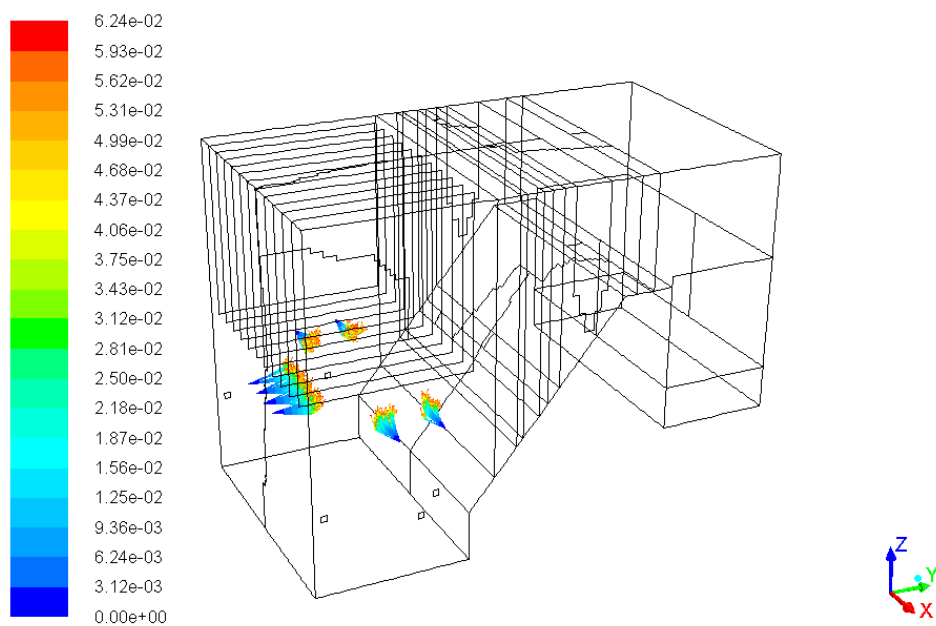
Obr.10.17 Koncentrace NO<sub>2</sub> ve spalínách při 80 % výkonu



Contours of Mass fraction of n2o

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

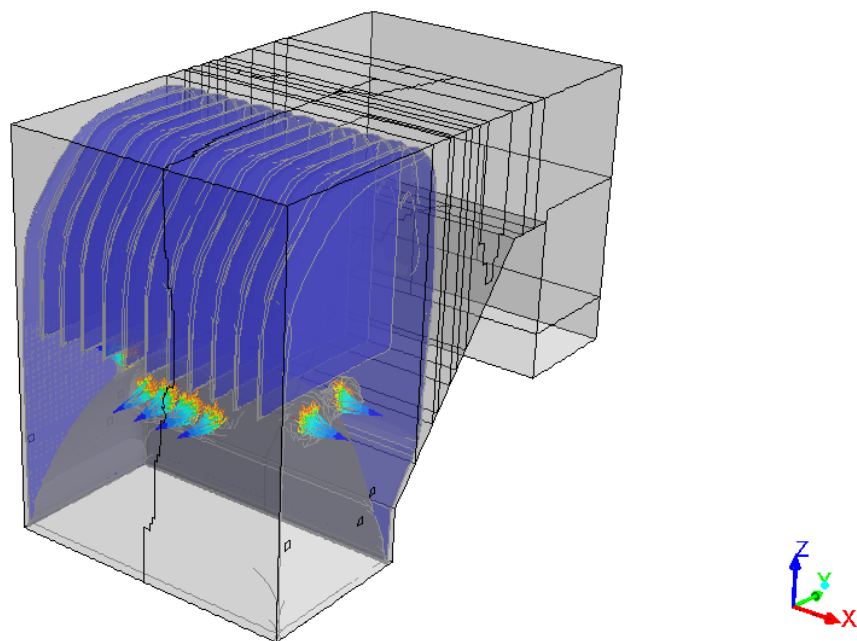
Obr.10.18 Koncentrace  $\text{N}_2\text{O}$  ve spalínách při 80 % výkonu



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

Obr.10.19 Setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře



Obr.10.20 Zobrazení teplotního okna pro 80 % výkonu

## 10.5. Simulace technologie SNCR pro 60 % výkonu

Hodnoty pro 60 % výkonu kotle		
Vstup	Hodnota	Jednotka
Hmotnostní průtok	66,5758	kg/s
Teplota na vstupu	1281	K
Hmotnostní zlomek O <sub>2</sub>	0,03914	1
Hmotnostní zlomek CO <sub>2</sub>	0,18807	1
Hmotnostní zlomek CO	0,00009	1
Hmotnostní zlomek NO	0,00018	1
Hmotnostní zlomek NO <sub>2</sub>	0,00001	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub> O	0,00004	1
Hmotnostní zlomek N <sub>2</sub>	0,77248	1
Teplota výměníků	917	K
Teplota stěn	804	K
Hmotnostní průtok čpavku	0,025941	kg/s
Zredukovaný hmotnostní průtok čpavku jedna tryska	0,000324	kg/s

Tab.10.13 Vstupní hodnoty pro 60 % výkonu

Hodnoty pro 60 % výkonu kotle		
Tepelný zdroj	Hodnota	Jednotka
EKO levé	-147753	W/m <sup>3</sup>
EKO pravé	-147753	W/m <sup>3</sup>
Výměník levý	-23707	W/m <sup>3</sup>
Výměník pravý	-23707	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 levý	-100949	W/m <sup>3</sup>
Výměník 2 pravý	-101030	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a levý	-218675	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4a pravý	-219097	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b levý	-144857	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4b pravý	-145081	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c levý	-102456	W/m <sup>3</sup>
Výměník 4c pravý	-102485	W/m <sup>3</sup>

Tab.10.14 Odvedené teplo z výměníků

Po nastavení všech potřebných okrajových podmínek pro simulaci technologie SNCR v granulačním kotli K4, při výkonu 60 % jsem spustil simulaci, jejíž výsledky jsou zaznamenány v Tab.10.15 a porovnány s měřením v Tab.10.16.

60 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky					
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	CO	NO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	Jednotka
Vstup	180	-	80,8	14,8	56,5	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	96	2,3	80,1	14,6	55,9	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	84	-	0,7	0,2	0,6	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 47	-	- 0,9	- 1,4	- 1,1	[%]

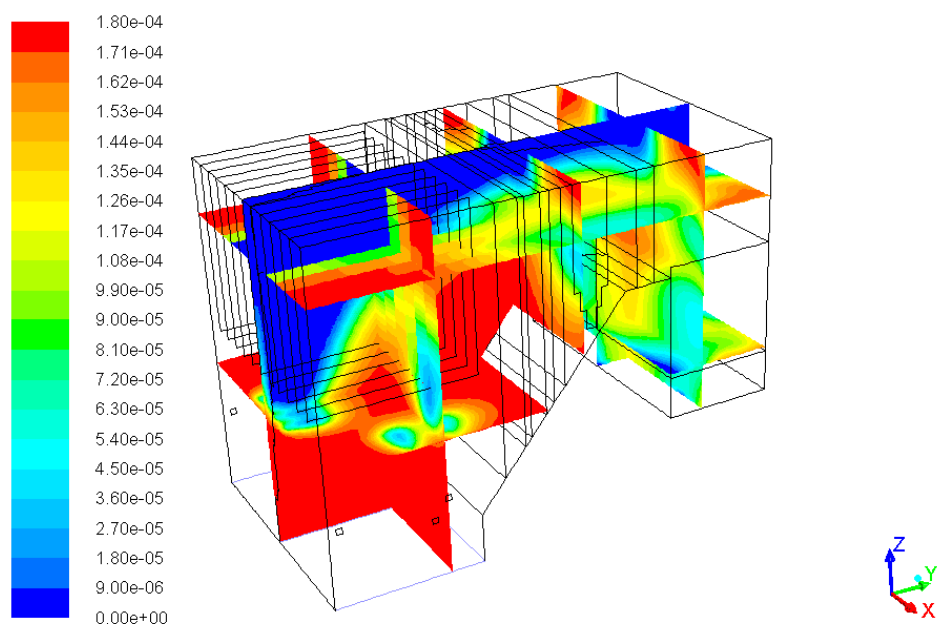
Tab.10.15 Výsledky simulace SNCR pro 60 % výkonu

60 % výkonu	Hmotnostní zlomek znečišťující látky				
	Simulace		Měření		
Koncentrace	NO	NH <sub>3</sub>	NO	NH <sub>3</sub>	Jednotka
Vstup	180	-	180	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Výstup	96	2,3	103	4,5	[mg/m <sup>3</sup> ]
Změna koncentrace	84	-	77	-	[mg/m <sup>3</sup> ]
Snížení koncentrace	- 47	-	- 43	-	[%]

Tab.10.16 Porovnání simulace s měřením pro 60 % výkonu

60 % výkonu	Hodnota	Jednotka
Doba setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře	0,068	[s]

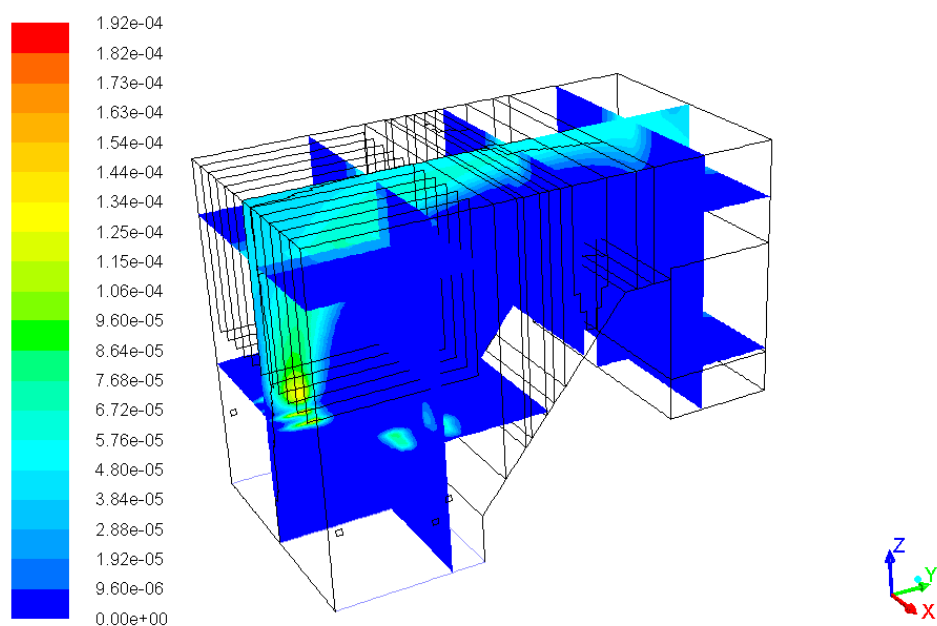
Tab.10.17 Doba setrvání kapiček v komoře při 60 % výkonu



Contours of Mass fraction of Pollutant no

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

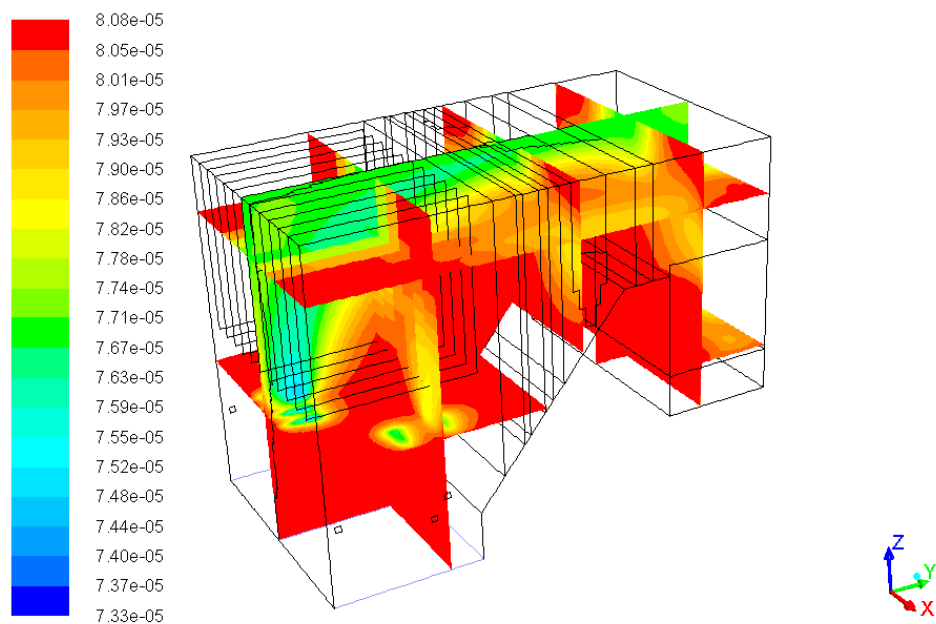
Obr.10.21 Koncentrace NO ve spalínách při 60 % výkonu



Contours of Mass fraction of Pollutant nh3

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

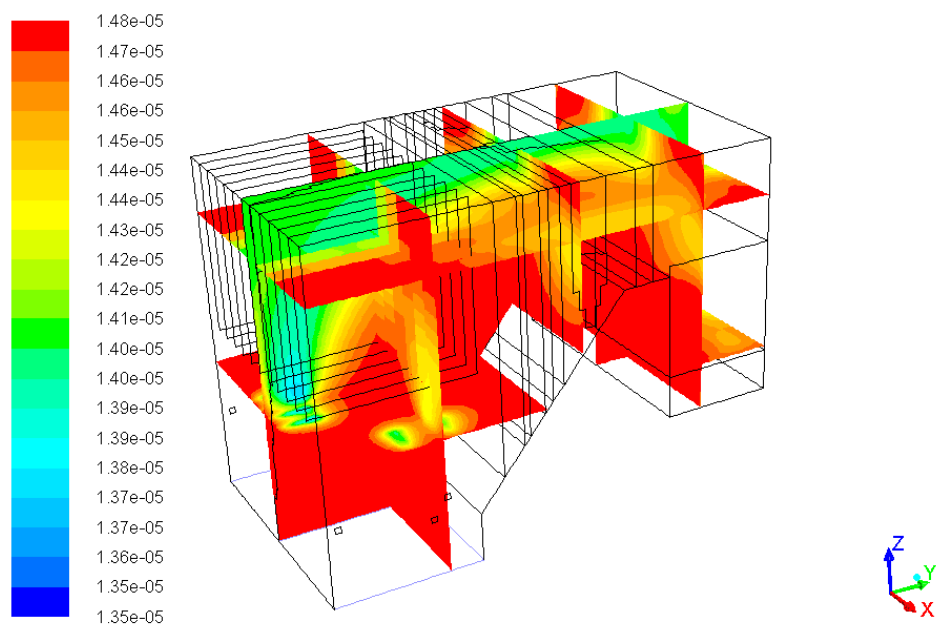
Obr.10.22 Koncentrace NH<sub>3</sub> ve spalínách při 60 % výkonu



Contours of Mass fraction of co

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

Obr.10.23 Koncentrace CO ve spalínách při 60 % výkonu

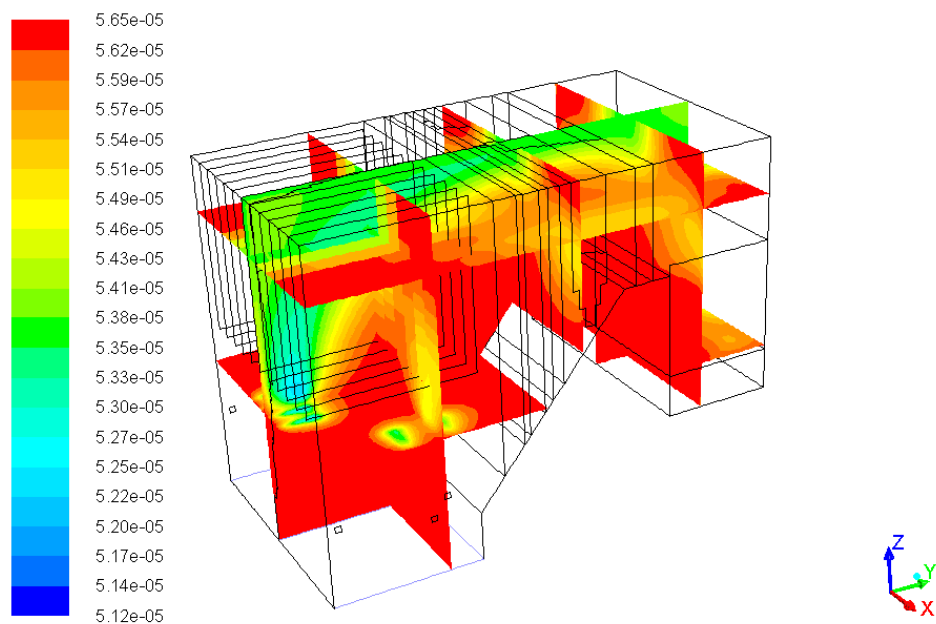


Contours of Mass fraction of no2

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

Obr.10.24 Koncentrace NO<sub>2</sub> ve spalínách při 60 % výkonu

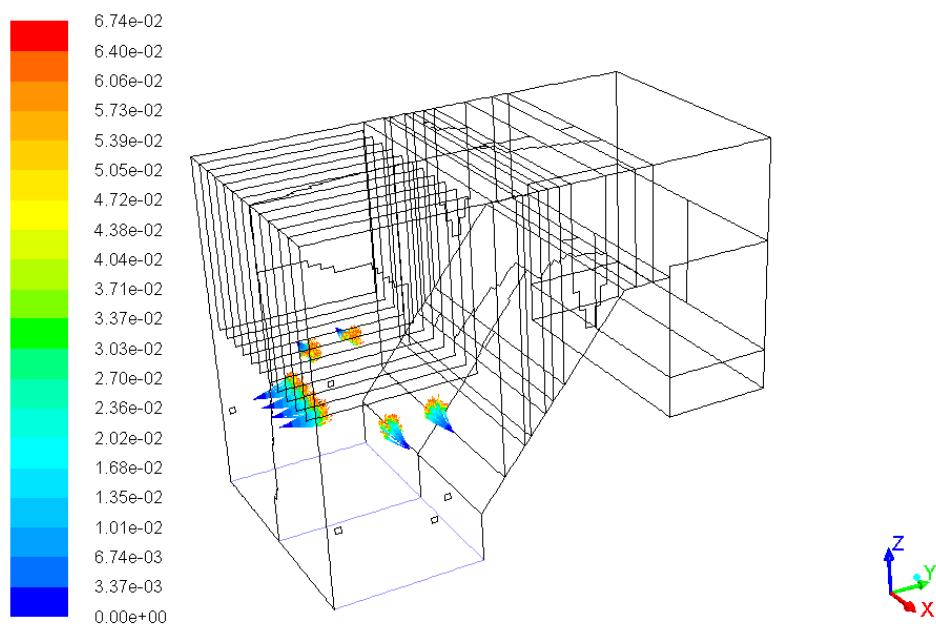




Contours of Mass fraction of n2o

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

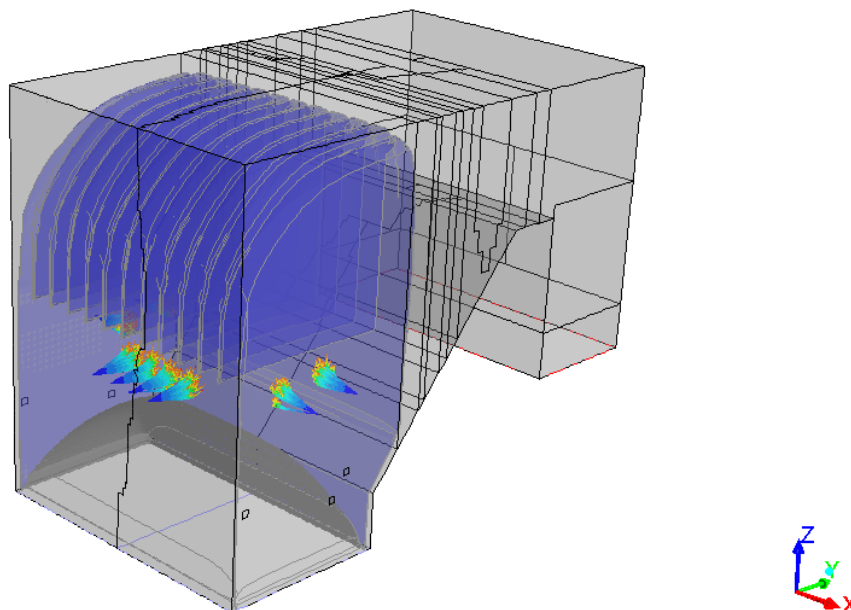
Obr.10.25 Koncentrace  $\text{N}_2\text{O}$  ve spalínách při 60 % výkonu



Particle Traces Colored by Particle Residence Time (s)

May 07, 2014  
ANSYS Fluent 14.5 (3d, dp, pbns, pdf20, ske)

Obr.10.26 Setrvání kapiček čpavku ve spalovací komoře



Obr.10.27 Zobrazení teplotního okna pro 60 % výkonu

## 11. Závěr

Smyslem této diplomové práce bylo vytvořit simulaci procesu SNCR ve spalovací komoře granulačního kotle K4, který spaluje hnědé uhlí. Na základě výkresové dokumentace byla v programu Ansys 14.5 vytvořena geometrie horní části granulačního kotle K4. Pro simulaci technologie SNCR v mé diplomové práci nebylo nutné vytvářet geometrii celého kotle, protože simulované chemické reakce probíhají v horní části kotle. Pro zadávání okrajových podmínek byla v geometrii určena vstupní rovina, výstupní rovina a stěny kotle. Celá vytvořená geometrie byla vysíťována.

Dle konstrukčních možností kotle bylo navrženo umístění trysek. V programu Ansys Fluent 14.5 bylo podle Tab. 10.2 vytvořeno osm vstřikovacích trysek. Čtyři trysky byly umístěny do čela kotle, dvě trysky na pravou stěnu kotle a dvě trysky na levou stěnu kotle. Hmotnostní průtok reagentu byl rovnoměrně rozdělen do všech trysek a vstřikování do spalovací komory bylo vodorovné. Aby se simulace co nejvíc blížila reálnému rozstříku, byl vybrán typ trysek plný kužel s úhlem rozstříku  $15^\circ$ .

Z předchozích simulací hoření hnědého uhlí v granulačním kotli K4, které byly dodány vedoucím diplomové práce, byly zjištěny všechny potřebné okrajové podmínky nutné k realizaci simulace technologie SNCR. Tyto okrajové podmínky byly nastaveny v programu Ansys Fluent 14.5. Po aktivaci implementovaného modulu SNCR a nastavení čpavku jako použitého reagentu byla spuštěna první simulace.

Po simulaci technologie SNCR pro hodnoty v Tab.10.3 bylo zjištěno, že základní hmotnostní průtok čpavku 0,048765 kg/s byl příliš veliký, protože na výstupní rovině byl v porovnání s měřením zjištěn mnohonásobně větší čpavkový skluz a velká redukce  $\text{NO}_x$ .

Díky testování různých hmotnostních průtoků čpavku bylo zjištěno, že vhodný celkový hmotnostní průtok pro simulaci v programu Fluent 14.5 bude cca 50 % ze základní zadané hodnoty. Základní zadaný hmotnostní průtok byl tak veliký, protože počítal s tím, že chemické reakce v reálném kotli neprobíhaly ideálně a bylo nutné redukovat nejen  $\text{NO}_x$  vzniklé při hoření, ale také redukovat  $\text{NO}_x$  vzniklé při nesprávných chemických reakcích čpavku.

Simulaci byla provedena pro tři výkonové úrovně granulačního kotle K4. Tyto úrovně byly 100 %, 80 % a 60 % výkonu kotle. Výsledky simulací byly porovnány s fyzikálním měřením, které bylo realizováno během provozních zkoušek technologie SNCR pro tři již zmíněné výkonové úrovně.

Z porovnání simulací a fyzikálních měření vyplynulo, že program Ansys Fluent 14.5 simuloval průběh redukce  $\text{NO}_x$  pomocí technologie SNCR příliš idealisticky a úplně nekoresponduje s reálným průběhem technologie SNCR, protože výstupní koncentrace  $\text{NO}_x$  byla vždy značně nižší než u provedeného fyzikálního měření. Také výstupní koncentrace  $\text{NH}_3$  zjištěná simulací byla výrazně nižší než v případě fyzikálního měření.

Výsledky simulací byly zobrazeny pomocí řezů. Graficky byly zobrazeny oblasti, ve kterých dochází k redukci  $\text{NO}_x$ . Dále byl zobrazen rozstřík čpavku ve spalovací komoře kotle a určena délka setrvání kapiček ve spalovací komoře.

Pro simulaci technologie SNCR je možné použít implementovaný modul SNCR v programu Ansys Fluent 14.5, ale musíme brát v úvahu, že tento modul je do značné míry idealistický. Proto musíme počítat s tím, že skutečná spotřeba reagentu bude u reálného zařízení dvakrát až třikrát větší než u simulace.

# Seznam použité literatury

[1] Ministerstvo životního prostředí [online]. Národní program snižování emisí 2007. Dostupné z WWW:

<[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni\\_program\\_s nizovani\\_emisi/\\$FILE/OO-O-NPSE\\_CR-20120117.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/narodni_program_s nizovani_emisi/$FILE/OO-O-NPSE_CR-20120117.pdf)>.

[2] Enviwiki [online]. Dostupné z WWW:

<<http://www.enviwiki.cz/wiki/REZZO>>

[3] Czech Coal Group [online]. Zpráva 2011. Dostupné z WWW:

<<http://www.czechcoal.cz/cs/novinky/zprava/2011/ur24.html>>

[4] Wikipedie [online]. Dostupné z WWW:

<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxidy\\_dus%C3%ADku#Oxidy\\_dus.C3.ADku](http://cs.wikipedia.org/wiki/Oxidy_dus%C3%ADku#Oxidy_dus.C3.ADku)>

[5] GRÝCMANOVÁ, M. Dosažení emisních limitů NO<sub>x</sub> metodou SNCR na vytipovaném energetickém zařízení. Ostrava, 2011. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava.

[6] Energyweb [online]. Dostupné z WWW:

<[http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=1&ee\\_chapter=2.5.7](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.5.7)>.

[7] Odpadové fórum [online]. Dostupné z WWW:

<<http://www.odpadoveforum.cz/DVD/dokumenty/prispevky/117.pdf>>

[8] Blejchař, T. Sestavení bilančních výpočtů teplosměnných ploch a výrobního tepla granulačního kotle K4. Ostrava 2009.

[9] Bojko, M. 3D proudění – Ansys Fluent učební text. VŠB-TU Ostrava, 2012.

Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz>>

[10] Kozubková, M. Modelování proudění tekutin Fluent, CFX. VŠB-TU Ostrava, 2008.

Dostupné z WWW: <<http://www.338.vsb.cz>>

[11] FLUENT: Fluent 14.5 - User's guide. Fluent Inc. 2012.